



**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**ANALISIS BAHAYA KEGEMPAAN DI WILAYAH MALANG  
MENGUNAKAN PENDEKATAN PROBABILISTIK**

**PAMBAYUN PURBANDINI  
NRP 1113 100 096**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Bambang Sunardi, M.T.**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**





**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**ANALISIS BAHAYA KEGEMPAAN DI WILAYAH MALANG  
MENGUNAKAN PENDEKATAN PROBABILISTIK**

**PAMBAYUN PURBANDINI  
NRP 1113 100 096**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Bambang Sunardi, M.T.**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



**FINAL PROJECT - SF 141501**

**SEISMIC HAZARD ANALYSIS IN MALANG REGION USING  
PROBABILISTIC APPROACH**

**PAMBAYUN PURBANDINI  
NRP 1113 100 096**

**Advisor Lecturer**

**Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Bambang Sunardi, M.T.**

**DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS BAHAYA KEGEMPAAN DI WILAYAH MALANG MENGGUNAKAN PENDEKATAN PROBABILISTIK

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains  
pada  
Bidang Fisika Bumi  
Program Studi S-1 Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Pambayun Purbandini**  
**1113 100 096**

**Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :**

**Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.** (.....)

**Bambang Sunardi, M.T.** (.....)



# ANALISIS BAHAYA KEGEMPAAN DI WILAYAH MALANG MENGGUNAKAN PENDEKATAN PROBABILISTIK

**Nama** : Pambayun Purbandini  
**NRP** : 1113 100 096  
**Departemen** : Fisika ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya  
Santosa, S.U.  
Bambang Sunardi, M.T.

## Abstrak

*Studi mengenai bahaya kegempaan dilakukan untuk meminimalisasi dampak dari bencana gempabumi di wilayah rawan bencana gempa. Penelitian ini mempresentasikan analisis bahaya kegempaan dengan menggunakan pendekatan probabilistik untuk wilayah Malang, Jawa Timur. Analisis PSHA yang dilakukan yaitu pada  $T=0$  detik (PGA),  $T=0.2$  detik (periode pendek), dan  $T=1$  detik (periode panjang). Digunakan model sumber gempa regional dan persamaan atenuasi standar terpublikasi untuk menghitung percepatan puncak tanah dengan probabilitas 2% dalam 50 tahun di batuan dasar. Software yang digunakan pada analisis ini adalah Crisis 2007. Data gempabumi yang digunakan untuk analisis ini adalah historis gempabumi dari tahun 1900 hingga 2017 dengan kedalaman 0-300 km, magnitudo  $\geq 5$  Mw, dan batas koordinat  $3,6^\circ$  -  $12.65^\circ$  LS dan  $108.2^\circ$  -  $117.2^\circ$  BT dari katalog gempabumi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan Katalog United States Geological Survey (USGS). Hasil menunjukkan rentang nilai percepatan 0.31 – 0.43 g untuk PGA, 0.62 – 0.88 g untuk periode pendek ( $T = 0.2$  detik), dan 0.22 – 0.28 g untuk periode panjang ( $T = 1$  detik). Rentang bahaya wilayah Malang bagian selatan didominasi oleh sumber gempa megathrust dan untuk wilayah Malang bagian utara didominasi oleh sumber gempa fault. Hal ini menunjukkan perbedaan dengan SNI 1726:2012.*

**Kata Kunci:** Atenuasi, PGA, Seismic Hazard, Sesar Kendeng

# SEISMIC HAZARD ANALYSIS IN MALANG REGION USING PROBABILISTIC APPROACH

**Nama** : Pambayun Purbandini  
**NRP** : 1113 100 096  
**Departemen** : Fisika ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Bambang Sunardi, M.T.

## Abstract

*Seismic hazard studies is conducted to minimize the effect of earthquake disaster in earthquake inclined area. This research presented earthquake hazard analysis using probabilistic approach in Malang region, East Java. PSHA analysis is performed at  $T=0$  second (PGA),  $T=0.2$  second (short period), and  $T=1$  seconds (long period). This research used regional earthquake source models and standard published attenuation equations to calculate peak ground acceleration at 2% probability of exceedance in 50 years in bedrock. Software that was used in this analysis is Crisis 2007. Earthquake data used in this analysis is the historical earthquake from 1900 to 2017 with the depth of 0-300 km, magnitude  $\geq 5$  Mw, and area of  $3.6^\circ - 12.65^\circ$  LS and  $108.2^\circ - 117.2^\circ$  BT taken from catalog of Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia and United States Geological Survey (USGS). The results showed that the ground acceleration of bedrock is  $0.31 - 0.43$  g for PGA ( $T=0$  second),  $0.62 - 0.88$  g for short period ( $T=0.2$  second), and  $0.22 - 0.28$  g for long period ( $T=1$  seconds). Hazard range for southern Malang is dominated by megathrust earthquake source and for northern Malang is dominated by fault earthquake source. This shows the difference with SNI 1726:2012.*

**Keywords** : Attenuation, Kendeng Fault, PGA, Seismic Hazard

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah. Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkah, rahmat serta hidayahNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir. Shalawat serta salam tetap tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kami dari kebodohan menuju cahaya kebenaran. Tugas Akhir ini penulis susun sebagai syarat wajib untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Fisika FMIPA ITS dengan judul:

### **“Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang Menggunakan Pendekatan Probabilistik”**

Penulis mempersembahkan Karya Tulis ini kepada masyarakat Indonesia guna berpartisipasi dalam perkembangan ilmu pengetahuan di bidang sains dan teknologi. Dalam penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis megucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sugeng Hariono dan Ibu Yayuk Sri Wahyuni yang telah mengajarkan banyak hal baik, selalu sabar dalam membimbing dan menasehati, senantiasa memberi motivasi, serta atas kasih sayangnya yang luar biasa.
2. Kakak tercinta, Danang Jaya Arganata, yang telah dengan begitu sabar memberi dukungan, teman berbagi cerita, dan juga telah mengajarkan banyak hal kepada penulis.
3. Adik sepupu, Farriel Meiza Anugerah, yang selalu berbagi canda tawa dan keceriaan kepada penulis disela-sela kesibukan kuliah.
4. Bapak Bambang Sunardi, M.T dan Bapak Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S. U sebagai dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberi bimbingan, ilmu, dan wawasan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.



5. Bapak Dr. rer. nat. Eko Minarto dan Ibu Nurrisma Puspitasari, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberi saran dan masukan.
6. Bapak Dr. Supriyanto Rohadi, Bapak Drajat Ngadmanto, S.Si, Ibu Sulastri, M.Sc, dan seluruh staff Puslitbang BMKG pusat atas bantuan, ilmu, dan kesempatan penelitian.
7. Seluruh staff pengajar dan karyawan di Jurusan Fisika ITS.
8. Keluarga Fisika ITS 2013 (Supernova 2013), Fairus Salimatul, Deviana Ambarsari, Vinda Zakiyatuz Zulfa, dan teman-teman seperjuangan yang telah menemani perjalanan penulis selama menjalani perkuliahan di Fisika FMIPA ITS.
9. Vidya, Nurin, Nike, Ali, Mbak Ningsih, Opik, dan Arfah, teman-teman seperjuangan tugas akhir di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Pusat yang telah menemani, berbagi, dan memberi semangat.
10. Anisah Rahmahnia dan Ahmad Farhan Farabi yang selalu menemani, berbagi tawa dan keceriaan, menasehati dalam banyak hal, dan selalu memberi motivasi di penghujung akhir masa perkuliahan.
11. Nisrina Ikbar Rahmawati yang telah menjadi teman dalam banyak hal, terima kasih sudah banyak membantu dan sabar dalam menghadapi penulis.
12. Rekan-rekan laboratorium geofisika yang selalu membantu dan memberi semangat.
13. Semua pihak yang telah membantu yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Semoga laporan ini memberikan manfaat, baik bagi penulis maupun pembaca dalam upaya menambah wawasan tentang ilmu fisika pada umumnya dan ilmu fisika bumi pada khususnya. Aamiin Yaa Robbal ‘Alamiin.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Gempabumi.....	7
2.1.1 Jenis Gempabumi.....	7
2.1.2 Teori Lempeng Tektonik.....	8
2.1.3 Teori <i>Elastic Rebound</i> .....	9
2.2 Tataan Tektonik Pulau Jawa.....	10
2.3 Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa.....	13
2.4 Karakterisasi Sumber Gempa.....	17
2.5 Analisis Potensi Bencana Alam.....	18
2.6 Analisis <i>Seismic Hazard</i> .....	19
2.6.1 Metode Deterministik ( <i>Deterministic Seismic Hazard Analysis</i> ).....	21
2.6.2 Metode Probabilistik ( <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i> ).....	22
2.7 Teori <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i> (PSHA).....	23
2.8 Teori Ketidakpastian dalam PSHA.....	24

2.9 <i>Logic-Tree</i> .....	25
2.10 Fungsi Atenuasi .....	27
2.10.1 Fungsi Atenuasi Abrahamson and Silva (1997) .....	28
2.10.2 Fungsi Atenuasi Spudich et al., (1997/99) .....	31
2.10.3 Fungsi Atenuasi Youngs et al. (1997) .....	33
2.10.4 Fungsi Atenuasi Garcia (2005) .....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	37
3.1 Daerah dan Waktu Penelitian .....	37
3.2 Pengumpulan Data .....	37
3.3 Tahapan Penelitian .....	37
3.3.1 Penyeragaman Skala Magnitudo .....	37
3.3.2 <i>Declustering</i> .....	38
3.3.3 Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa .....	39
3.3.4 Karakterisasi Sumber Gempa .....	44
3.3.5 Penentuan Fungsi Atenuasi .....	46
3.3.6 <i>Logic-tree</i> .....	47
3.3.7 Analisis Bahaya Gempa .....	49
3.3.8 Peta Percepatan Tanah di Batuan Dasar .....	49
3.3.9 Kurva Bahaya Gempa ( <i>Seismic Hazard Curve</i> ) .....	50
3.4 Diagram Alir Penelitian .....	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	53
4.1 Analisis <i>Probabilistic Seismic Hazard</i> .....	53
4.2 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar (PGA) .....	53
4.3 Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra T = 0.2 detik ( $S_s$ ) .....	56
4.4 Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra T = 1 detik ( $S_1$ ) .....	58
4.5 Perbandingan dengan SNI 1726:2012 .....	60
4.6 Kurva Bahaya Gempa ( <i>Seismic Hazard Curve</i> ) .....	62
4.6.1 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kota Malang ....	62
4.6.2 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kota Batu .....	64
4.6.3 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Sumbermanjing .....	65

4.6.4 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Kepanjen.....	67
4.6.5 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Bumiaji .....	68
4.6.6 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Singosari.....	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN .....	81

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Salah satu rumah warga yang rusak akibat gempa 16 November 2016 di Desa Tanggung, Kecamatan Turen, Kabupaten Malang .....	2
Gambar 2.1 Arah dan kecepatan gerakan lempeng tektonik .....	9
Gambar 2.2 Mekanisme terjadinya gempabumi menurut teori <i>elastic rebound</i> .....	10
Gambar 2.3 Penampang melintang kondisi tektonik Pulau Jawa	12
Gambar 2.4 Sistem sesar di sekitar wilayah Jawa Timur .....	12
Gambar 2.5 Zona subduksi busur Jawa-Sumba .....	13
Gambar 2.6 Sketsa batas lempeng tektonik.....	13
Gambar 2.7 Model zona <i>megathrust</i> dan zona <i>benioff</i> .....	16
Gambar 2.8 Distribusi magnitudo dari berbagai sumber gempa .	17
Gambar 2.9 Metode PSHA untuk mendapatkan nilai pergerakan tanah di batuan dasar .....	23
Gambar 2.10 Contoh <i>logic-tree</i> yang digunakan dalam analisis <i>seismic hazard</i> .....	26
Gambar 2.11 Spektra atenuasi (Abrahamson and Silva, 1997) ...	31
Gambar 2.12 Spektra atenuasi Spudich et al. (1997/99) .....	32
Gambar 2.13 Spektra atenuasi (Youngs et al., 1997) .....	34
Gambar 3.1 Data Gempa Utama dengan Radius 500 km dari Pusat Koordinat wilayah Malang (-8.152° LS dan 112.691° BT) dari tahun 1900 hingga 2017. ....	39
Gambar 3.2 Pemodelan Sumber Gempa .....	40
Gambar 3.3 Data gempa untuk model <i>shallow background</i> (a), <i>deep 1</i> (b), <i>deep 2</i> (c), <i>deep 3</i> (d), dan <i>deep 4</i> (e) .....	44
Gambar 3.4 Bentuk tipikal dari garis Gutenberg-Richter .....	45
Gambar 3.5 Model <i>logic tree</i> sumber gempa subduksi. ....	48
Gambar 3.6 Model <i>logic tree</i> sumber gempa <i>fault</i> .....	48
Gambar 3.7 Model <i>logic tree</i> sumber gempa <i>background</i> .....	49
Gambar 3.8 <i>Flowchart</i> penelitian.....	51

Gambar 4.1 Peta nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dengan $T = 0$ detik.....	55
Gambar 4.2 Peta nilai percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra $T = 0.2$ detik untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun.....	57
Gambar 4.3 Peta nilai percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra $T = 1$ detik untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun.....	59
Gambar 4.4 (a) Peta percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun pada (SNI, 2012), (b) Peta percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun hasil penelitian.....	61
Gambar 4.5 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kota Malang. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kota Malang (warna merah).....	63
Gambar 4.6 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kota Batu. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kota Batu (warna merah).....	65
Gambar 4.7 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Sumbermanjing. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Sumbermanjing (warna merah) .....	66
Gambar 4.8 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Kepanjen. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Kepanjen (warna merah) .....	68
Gambar 4.9 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Bumiaji. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Bumiaji (warna merah).....	69
Gambar 4.10 (a) Kurva <i>hazard</i> gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Singosari. (b) Peta wilayah	

Malang dan lokasi daerah Kecamatan Singosari (warna merah) .....	71
--	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan dari parameter resiko gempabumi.....	19
Tabel 3.1 Korelasi konversi beberapa skala magnitudo untuk wilayah Indonesia.....	38
Tabel 3.2 Data dan parameter sumber gempa subduksi .....	45
Tabel 3.3 Data dan parameter sumber gempa <i>fault</i> .....	46
Tabel 3.4 Fungsi Atenuasi yang digunakan pada wilayah penelitian .....	46



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Kota/Kabupaten Malang merupakan salah satu wilayah tujuan wisata di Jawa Timur karena potensi alam dan iklim yang dimiliki. Kota Malang sendiri merupakan salah satu daerah otonom dan kota terbesar kedua di Jawa Timur setelah Surabaya. Selain itu, kota yang pernah dianggap mempunyai tata kota terbaik di antara kota-kota Hindia-Belanda ini juga dikenal sebagai kota pendidikan karena banyaknya fasilitas pendidikan yang tersedia dari mulai tingkat Taman Kanak-kanak, Sekolah Dasar sampai Pendidikan Tinggi dan jenis pendidikan non-formal lain (BPS Kota Malang, 2011). Selain itu, wilayah ini terletak di lokasi yang cukup tinggi yaitu 250-500 meter di atas permukaan laut (dpl) untuk daerah lembah hingga ketinggian 500-3600 untuk daerah lereng pegunungan (BPS Kota Malang, 2016).

Malang merupakan salah satu wilayah yang sering merasakan dampak ketika terjadi gempabumi. Hal ini disebabkan karena dinamika tektonik di bagian selatan wilayah Malang yang didominasi oleh gerakan lempeng India-Australia yang bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam. Berdasarkan data gempa signifikan dan merusak dari BMKG, wilayah Malang sering dilanda gempa signifikan. Diantaranya yaitu gempa dengan jumlah korban meninggal 8 orang, rumah-rumah mengalami kerusakan serius, terjadi rekahan tanah di beberapa tempat, dan tanah longsor di daerah pegunungan, yang terjadi pada 20 Oktober 1958 dengan kekuatan 6,7 SR. Selain itu gempa pada 19 Februari 1967 dengan kekuatan 6,2 SR dengan total korban meninggal 23 orang, luka-luka 131 orang, dan ribuan bangunan mengalami kerusakan. Wilayah ini juga kerap merasakan dampak dari gempabumi seperti pada tahun 1961 dan 1998 (BMKG, 2009).

Sepanjang tahun 2016, BMKG Kelas III Karangates telah merilis sebanyak 399 kejadian gempabumi di Jawa Timur

dengan rincian 365 gempabumi dangkal, 32 gempabumi menengah, dan 2 gempabumi dalam. Aktivitas gempabumi yang merusak bangunan memiliki kekuatan  $M=6.2$  SR yang terjadi di tenggara Malang pada tanggal 16 November 2016 (Malang Times, 2016). Gempabumi tersebut menyebabkan 29 rumah rusak akibat dan tiga rumah rusak berat. Gambar 1.1 menunjukkan salah satu rumah warga yang rusak akibat gempabumi. Gempabumi tersebut berkekuatan 6,2 skala richter yang dipicu oleh aktivitas subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia (Kompas.com, 2016a)



Gambar 1.1 Salah satu rumah warga yang rusak akibat gempa 16 November 2016 di Desa Tanggung, Kecamatan Turen, Kabupaten Malang (Kompas.com, 2016a)

Dari data tingkat seismisitas yang tinggi tersebut, mitigasi bencana gempabumi sangat diperlukan untuk mengurangi bahaya yang diakibatkan oleh kejadian gempabumi. Ada beberapa upaya untuk mitigasi gempabumi, salah satunya adalah dengan membuat perencanaan tata wilayah yang telah sesuai dengan kajian gempabumi seperti menggunakan analisis bahaya gempa (Kumala and Wahyudi, 2016; Nugraha, 2014).

Para ahli gempa terus berupaya melakukan pengembangan suatu metode perhitungan bahaya kegempaan yang berguna untuk meminimalisasi kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa, salah satunya dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Metode PSHA pertama kali dikembangkan berdasarkan teori probabilitas total yang dikemukakan oleh (Cornell, 1968). Metode ini menghitung tingkat guncangan tanah di lokasi tertentu secara probabilistik, artinya metode ini ikut menghitung faktor ketidakpastian dalam analisis seperti ukuran, lokasi, dan frekuensi kejadian gempabumi. Hingga saat ini, metode ini terus mengalami perkembangan dan merupakan salah satu metode yang cukup populer dan banyak dipergunakan. Kelebihan dari metode ini yaitu memungkinkan untuk memasukkan pengaruh faktor-faktor ketidakpastian dalam analisis. Faktor-faktor ketidakpastian tersebut dapat diidentifikasi dan diperkirakan untuk selanjutnya digabungkan dengan metode pendekatan yang rasional di dalam PSHA dalam rangka memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang kejadian gempa di suatu wilayah. Selain itu, keunggulan lain dari metode ini adalah mampu mengintegrasikan *hazard* dari suatu lokasi terhadap berbagai sumber gempa (Fauzi, 2011).

Penelitian terbaru yang dilakukan oleh (Koulali et al., 2016) mengungkapkan adanya keberadaan sumber gempa baru di wilayah Jawa Timur. Sumber gempa tersebut berasal dari Sesar Kendeng, yaitu patahan yang melintang sejauh 300 kilometer dari selatan Semarang, Jawa Tengah, hingga Jawa Timur. Hasil kolaborasi peneliti Institut Teknologi Bandung (ITB), Badan Informasi Geospasial (BIG), dan *Australia National University* (ANU) tersebut untuk pertama kalinya mengonfirmasi bahwa Sesar Kendeng masih aktif dengan pergerakan 5 mm per tahun. Segmen yang berada di daratan Jawa, termasuk Sesar Kendeng dan sebelah utara Bali dikonfirmasi sebagai patahan aktif dan bisa menimbulkan gempa (Kompas.com, 2016b).

Penelitian tentang bahaya gempa (*seismic hazard*) untuk wilayah Malang masih jarang dilakukan. Beberapa penelitian

terdahulu umumnya masih bersifat global untuk skala Indonesia maupun provinsi Jawa Timur. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian bahaya gempa di wilayah Malang dengan melibatkan sumber gempa terbaru penting untuk dilakukan. Penelitian ini akan melengkapi penelitian yang ada sebelumnya. Hasil penelitian diharapkan dapat dimanfaatkan dalam upaya mitigasi bencana gempa dan sebagai bahan acuan tata wilayah area tersebut.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah sebagaimana berikut:

- a. Bagaimana nilai percepatan tanah di batuan dasar untuk wilayah Malang menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA)?
- b. Bagaimana menentukan sumber gempa yang paling dominan mempengaruhi suatu lokasi di wilayah Malang?
- c. Bagaimana pengaruh Sesar Kendeng terhadap bahaya kegempaan (*seismic hazard*) di wilayah Malang?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagaimana berikut:

- a. Wilayah penelitian adalah wilayah Malang meliputi Kota Malang, Kecamatan Kepanjen, Kecamatan Sumbermanjing, Kecamatan Bumiaji, Kecamatan Singosari, dan Kota Batu.
- b. Data gempa yang dipergunakan berasal dari USGS dan BMKG dari tahun 1900 – 2016 dengan batasan koordinat  $3,6^{\circ}$  -  $12,65^{\circ}$  LS dan  $108,2^{\circ}$  -  $117,2^{\circ}$  BT atau dengan radius 500 km dari pusat wilayah Malang (koordinat pusat:  $-8,152^{\circ}$  LS dan  $112,691^{\circ}$  BT).
- c. Data gempa yang digunakan adalah gempa utama (*mainshock*).
- d. Perhitungan percepatan tanah di batuan dasar dibatasi hanya untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau setara

dengan periode ulang gempa 2500 tahun menggunakan software Crisis 2007.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagaimana berikut:

- a. Memetakan percepatan tanah di batuan dasar untuk wilayah Malang menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA).
- b. Membuat kurva bahaya gempa (*seismic hazard curve*) untuk menentukan sumber gempa yang paling dominan mempengaruhi suatu lokasi di wilayah Malang.
- c. Menganalisis pengaruh sesar Kendeng terhadap bahaya kegempaan (*seismic hazard*) di wilayah Malang.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini di antaranya:

- a. Memberikan informasi mengenai bahaya gempa di wilayah Malang yang tercermin dalam nilai percepatan tanah di batuan dasar sebagai upaya mitigasi gempa.
- b. Kurva bahaya gempa (*seismic hazard curve*) dapat memberikan informasi sumber gempa yang paling dominan mempengaruhi suatu lokasi di wilayah Malang.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan tugas akhir ini secara garis besar adalah sebagai berikut:

- |         |   |
|---------|---|
| BAB I   | : Pendahuluan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.   |
| BAB II  | : Tinjauan pustaka yang terdiri atas teori yang digunakan dalam melakukan penelitian tugas akhir. |
| BAB III | : Metodologi penelitian meliputi prosedur   |

kerja dalam melakukan penelitian tugas akhir.

BAB IV : Hasil dan pembahasan yang meliputi tahap pengolahan data dan analisa data yang didapatkan selama tugas akhir.

BAB V : Penutup merupakan bagian penutup dari tugas akhir ini yang terdiri dari kesimpulan dan saran.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gempabumi**

Kejadian gempa sangat erat kaitannya dengan gerakan lempeng tektonik dan teori *elastic rebound*. Lempeng-lempeng tektonik di dunia bergerak menurut arah dan kecepatannya masing-masing. Gerakan lempeng-lempeng tektonik tersebut ada yang saling menjauhi, saling mendekati, atau saling bergeser. Gerakan ini berlangsung lambat, kadang-kadang gerakan lempeng tersebut macet dan saling mengunci. Akibatnya terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus menerus, apabila batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut, terjadilah pelepasan energi secara mendadak yang biasa dikenal sebagai gempa (Sunardi, 2013).

Gempa merupakan manifestasi dari getaran lapisan batuan yang patah yang energinya menjalar melalui badan dan permukaan bumi berupa gelombang seismik. Energi yang dilepaskan pada saat terjadinya patahan tersebut dapat berupa energi deformasi, energi gelombang, dan lain-lain. Energi deformasi ini dapat terlihat pada perubahan bentuk sesudah terjadinya patahan, contohnya pergeseran. Sedang energi gelombang menjalar melalui medium elastis yang dilewatinya yaitu lapisan bumi dan dapat dirasakan di daerah terjadinya gempa tersebut (Sunardi, 2013).

##### **2.1.1 Jenis Gempabumi**

Menurut (Bolt, 1978), gempa dikategorikan berdasarkan penyebabnya sebagaimana berikut.

###### **1. Gempa Vulkanik (*Vulcanic Earthquake*)**

Gempa ini terjadi akibat adanya aktivitas vulkanik yang berasal dari tekanan dan panas dari dalam bumi. Magma yang berada pada kantong di bawah gunungapi akan keluar dengan tidak lancar sehingga dapat menimbulkan ledakan. Getaran pada tanah yang disebabkan oleh proses keluarnya magma tersebut

menyerupai gempa walaupun intensitasnya lebih kecil dari gempa tektonik.

## 2. Gempa Tektonik (*Tectonic Earthquake*)

Gempa ini erat kaitannya dengan aktivitas lempeng tektonik baik skala regional maupun global. Gerakan lempeng tektonik dapat saling bertemu (*convergent*), saling Tarik (*tension*), saling menggeser (*shear*), maupun kombinasi di antaranya. Gempa ini umumnya lebih besar dibandingkan dengan jenis gempa yang lainnya.

## 3. Gempa Runtuhan (*Collapse Earthquake*)

Gempa ini disebabkan karena adanya runtuh lapisan tanah baik runtuh di dalam gua ataupun tambang dalam batas-batas tertentu dapat mengakibatkan getaran pada tanah. Getaran tanah yang terjadi mirip dengan gempa walaupun intensitasnya relatif kecil.

## 4. Gempa Ledakan (*Explosion Earthquake*)

Gempa ini dikarenakan adanya ledakan yang cukup besar di dalam tanah, misalnya akibat percobaan ledakan nuklir di dalam tanah. Ledakan tersebut akan menghasilkan energi dan tekanan yang sangat tinggi. Karena begitu besarnya getaran yang ditimbulkan sehingga getaran tersebut dapat menjalar dari pusat ledakan ke segala arah termasuk ke permukaan tanah dan dapat dirasakan seperti gempa.

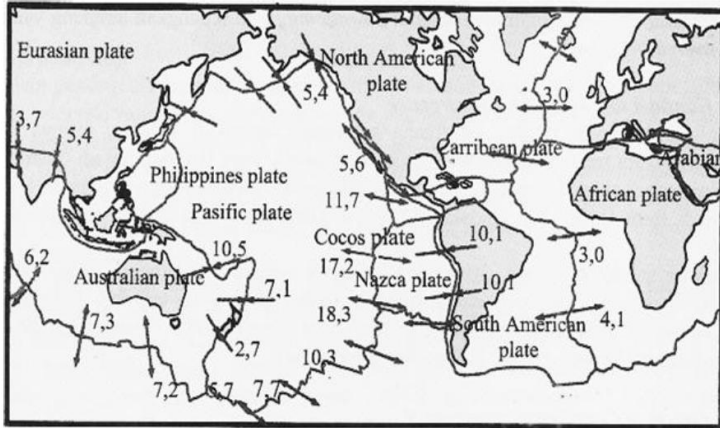
### 2.1.2 Teori Lempeng Tektonik

Teori ini dikembangkan berdasarkan teori *continental drift* yang menyebutkan bahwa lapisan *lithosfer* bukanlah lapisan yang masif dan homogen tetapi terdiri atas lapisan yang tidak masif dan pecah-pecah. Bentuk lapisan *lithosfer* yang seperti itu terjadi karena penyusutan bumi akibat pendinginan pada lapisan luar saat periode pembentukan lapisan-lapisan di dalam bumi. Penyusutan lapisan terjadi pada arah radial dan tangensial sebagai kombinasi antara gaya gravitasi dan proses pendinginan lapisan luar bumi.

Dikarenakan lapisan *lithosfer* bukanlah lapisan yang homogen maka pecahnya lapisan ini juga tidak teratur. Lokasi



retakan atau pecahan lapisan ini biasanya terjadi pada bagian yang relatif lemah. Akibat adanya retakan atau pecahan lapisan *lithosfer* ini, di lapisan luar bumi akan terbentuk lempeng-lempeng *lithosfer* yang selanjutnya disebut lempeng tektonik (Prawirodikromo, 2012).



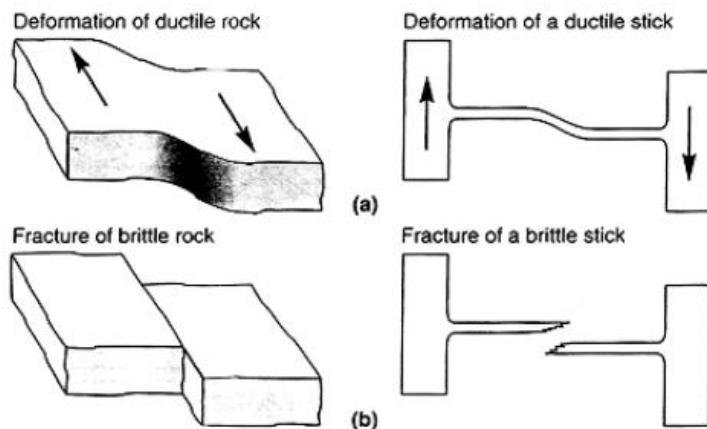
Gambar 2.1 Arah dan kecepatan gerakan lempeng tektonik (Prawirodikromo, 2012)

### 2.1.3 Teori *Elastic Rebound*

Teori yang menjelaskan mengenai mekanisme terjadinya gempa bumi akibat adanya pergeseran sesar adalah teori bingkai elastik (*elastic rebound theory*). Teori ini dikemukakan oleh (Reid, 1911). Konsep teori ini menyatakan bahwa gempa bumi terjadi akibat proses pergerakan sesar di dalam kerak bumi sebagai akibat pelepasan mendadak dari *strain* elastik yang melampaui kekuatan batuan. Regangan elastik tersebut akan terakumulasi seiring dengan deformasi batuan yang terjadi secara terus-menerus dan semakin besar. Ketika terjadi pergeseran sesar, bagian yang berseberangan dengan sesar meloncat ke posisi kesetimbangan yang baru dan energi yang dilepaskan akan berbentuk getaran gelombang elastik yang menjalar dalam bumi dan dirasakan sebagai gempa bumi. Ilustrasi dari mekanisme gempa bumi dapat dijelaskan dalam Teori Bingkai Elastik.

Teori ini juga menjelaskan bahwa tingkat kerusakan batuan akibat proses pelepasan energi dipengaruhi oleh karakteristik batuan tersebut. Apabila batuan lemah dan bersifat *ductile*, maka regangan yang tersimpan akan dilepaskan secara lambat dan pergerakannya terjadi secara aseismik. Apabila batuan kuat dan bersifat *brittle*, maka keruntuhan cepat akan terjadi dan menimbulkan gempa. Setelah gempa terjadi proses penimbunan energi akan berlangsung kembali sampai suatu saat gempa terjadi lagi (Mahesworo, 2008).

Gambar 2.2 berikut merupakan mekanisme terjadinya gempabumi menurut teori *elastic rebound*.



Gambar 2.2 Mekanisme terjadinya gempabumi menurut teori *elastic rebound* (Reid, 1911)

## 2.2 Tatanan Tektonik Pulau Jawa

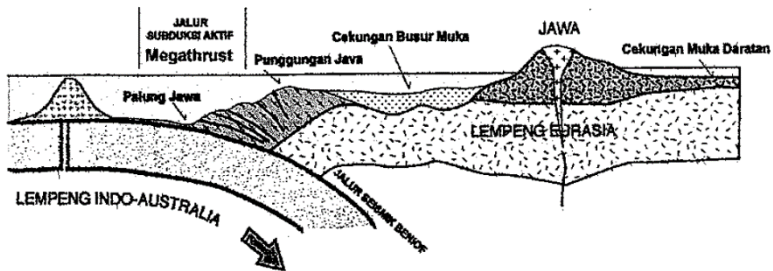
Berdasarkan kondisi tektoniknya, tektonik wilayah Jawa dikontrol oleh penunjaman (subduksi) Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia yang membentuk sistem Busur Sunda di daerah *offshore* yang terdiri dari palung Jawa, cekungan busur muka, dan punggung Jawa. Selain dipengaruhi oleh subduksi Sunda, kondisi tektonik pulau Jawa juga dipengaruhi oleh seismisitas regional Jawa yang berupa sesar-sesar dan *normal*

*faulting* di laut Jawa. Dari kondisi tektonik tersebut, mengakibatkan daerah-daerah di sepanjang Busur Sunda seperti Pulau Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat (NTB) menjadi daerah yang memiliki tingkat kerawanan gempa yang cukup tinggi. Kurang dari 30 tahun terakhir, wilayah Jawa Bali, NTB, dan sekitarnya pernah diguncang 39 kejadian gempa dengan magnitudo di atas 6 Skala richter (SR) (Katili, 1980; Nugraha, 2014).

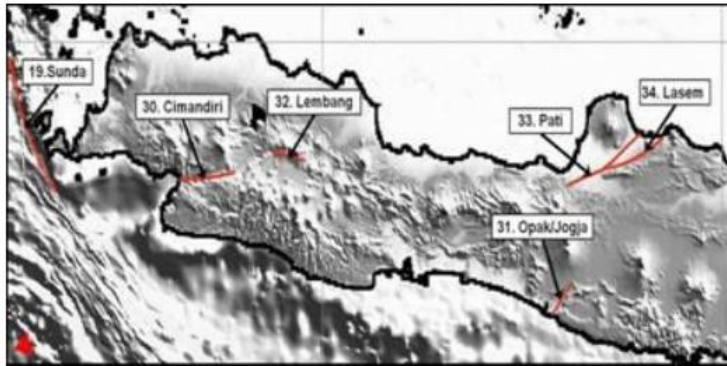
Untuk wilayah Jawa Timur, wilayah ini dipengaruhi oleh zona subduksi atau pertemuan dua lempeng tektonik yang berada di sekitar selatan Jawa Timur. Zona subduksi yang terletak pada wilayah selatan dari Indonesia ini yang diketahui sebagai sumber gempa yang membentuk sistem Busur Sunda yang meregang dari barat Pulau Andaman menuju ke bagian timur Pulau Banda. Sebelah timur bagian Busur Sunda menjangkau Busur Banda yang berawal dari bagian timur Pulau Sumbawa menuju ke Pulau Timor.

Aktivitas seismik di wilayah Jawa Timur tidak hanya dipengaruhi oleh zona subduksi yang berada di selatan Pulau Jawa, tapi juga dipengaruhi oleh aktivitas patahan, baik patahan lokal maupun patahan regional. Untuk patahan di wilayah Jawa Timur, masih banyak yang belum diidentifikasi dan penelitian masih dilakukan oleh *Geological Agency*. Berdasarkan peta patahan dari *Geological Agency* ada beberapa patahan yang telah diteliti di wilayah Jawa Timur, seperti patahan Tulungagung, Lumajang, dan patahan Banyu Putih. Ketiga patahan tersebut termasuk dalam kelas B, dengan magnitudo maksimum  $\geq 6.5 - 7$  Mw dengan *slip rate*  $< 2$  hingga  $< 5$  mm/tahun (Susilo and Adnan, 2013).

Dalam analisa *seismic hazard* untuk area Jawa Timur, tidak hanya dipengaruhi oleh patahan dan mikroseismik di Jawa Timur saja, akan tetapi juga dipengaruhi oleh aktivitas patahan yang berada di sekitar wilayah Jawa Timur, seperti Sesar Lasem, Sesar Pati, dan Sesar Opak. Aktivitas sesar yang dimaksud adalah seperti ditunjukkan pada gambar 2.3 dan gambar 2.4 di bawah ini.



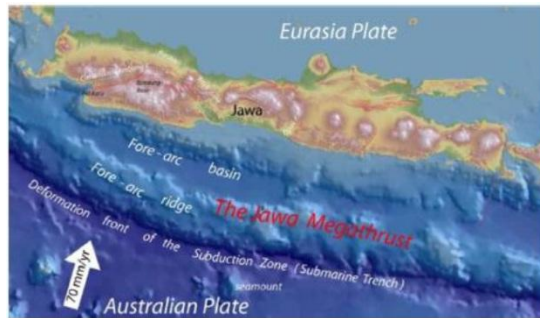
Gambar 2.3 Penampang melintang kondisi tektonik Pulau Jawa (Katili, 1980)



Gambar 2.4 Sistem sesar di sekitar wilayah Jawa Timur (Susilo and Adnan, 2013)

(Newcomb and McCann, 1987) menyatakan bahwa lempeng samudera yang lebih padat dan lebih tua sepanjang segmen Jawa menambah komponen vertikal dari gerakan subduksi sehingga mengurangi besarnya *seismic coupling* dan kemungkinan terjadinya gempa sangat besar. Perbesaran *dip* dan kedalaman penetrasi dari zona seismik *benioff* sepanjang segmen Jawa kemungkinan juga merupakan akibat penunjaman lempeng yang lebih padat dan lebih tua. Sistem tektonik Jawa dan sekitarnya dikontrol oleh tektonik yang menunjam (subduksi) busur Sunda bagian barat dan subduksi Jawa-Sumba. Akibat adanya penunjaman tersebut terbentuklah struktur-struktur geologi regional di wilayah daratan yang dapat diamati mulai

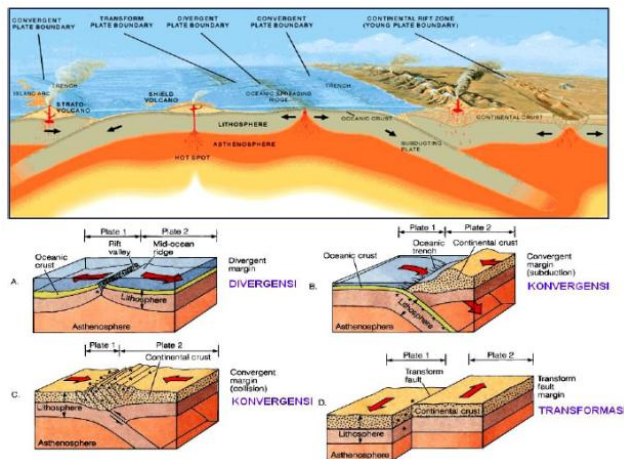
Jawa bagian timur. Pada gambar 2.5 ini merupakan zona subduksi busur Jawa-Sumba.



Gambar 2.5 Zona subduksi busur Jawa-Sumba (Natawidjaja, 2007)

### 2.3 Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa

Sumber gempa menggambarkan suatu area pada sebuah lempeng yang memiliki karakteristik aktivitas gempa yang berbeda terhadap lempeng di sekitarnya. Gambar 2.6 di bawah ini menggambarkan mengenai pergerakan lempeng-lempeng tektonik relatif satu dengan yang lainnya dan menghasilkan tiga jenis pertemuan lempeng.



Gambar 2.6 Sketsa batas lempeng tektonik

Tiga jenis pertemuan lempeng antara lain sebagaimana berikut.

1. Batas divergen (*constructive boundaries*), terjadi apabila batas pertemuan lempeng bergerak saling menjauhi. Ketika lempeng tektonik pecah, lapisan litosfer menipis dan terbelah membentuk batas divergen. Proses ini menyebabkan pemekaran dasar laut (*seafloor spreading*) pada lempeng samudera dan terbentuk lembah retakan (*rift valley*) pada lempeng benua. Contoh dari zona divergen adalah *Mid-Atlantic Ridge* yang membujur dari utara ke selatan di Samudera Atlantik.
2. Batas konvergen/destruktif (*destructive boundaries*), terjadi apabila dua lempeng tektonik tertelan (*consumed*) menuju kerak bumi atau saling bertabrakan yang mengakibatkan keduanya bergerak saling menumpu satu sama lain (*one slip beneath another*). Proses ini disebut dengan subduksi, yaitu ketika salah satu lempeng menunjam ke bawah lempeng yang lainnya. Lempeng yang menunjam ke bawah tersebut dinamakan *downgoing plate*, dan lempeng yang di atas dinamakan *overriding plate*. Wilayah di mana suatu lempeng samudera terdorong ke bawah lempeng benua atau lempeng samudera lain disebut dengan zona tunjaman (*subduction zones*). Di zona tunjaman inilah sering terjadi gempa.
3. Batas transformasi (*transform boundaries*), terjadi apabila dua lempeng tektonik bergerak secara horizontal dan saling berpapasan satu sama lain tanpa pembentukan kerak baru atau penelanan kerak lama. Contoh dari batas transformasi adalah Sesar Sumatera di Pulau Sumatera (Prawirodikromo, 2012).

Pada publikasi terkini, tatanan seismotektonik wilayah Indonesia telah dievaluasi secara rinci oleh beberapa peneliti yang dipakai sebagai acuan untuk pembuatan model sumber gempa dan input parameter PSHA. Model sumber gempa diperlukan dalam hubungan antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa. Model

sumber gempa dapat memberikan gambaran frekuensi kejadian gempa, distribusi episenter kejadian gempa historis, dan pergeseran relatif lempeng (*slip-rate*) dari suatu sumber gempa (Irsyam et al., 2010).

Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang mempunyai derajat gempa yang sama, di mana di setiap titik dalam zona tersebut mempunyai kemungkinan yang sama akan terjadinya gempa di masa mendatang (Irsyam et al., 2010). Model sumber gempa diperlukan sebagai hubungan antara kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat bahaya gempabumi. Dalam pemodelan, batasan suatu zona sumber gempa yang digunakan adalah sebagaimana berikut (Sunardi, 2013).

1. Jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dengan batasan hingga 500 km
2. Kedalaman sumber gempa dengan batasan hingga 300 km
3. Fungsi atenuasi yang digunakan untuk setiap model adalah fungsi atenuasi yang dianggap sesuai dengan karakteristik kegempaan dan model sumber gempa untuk wilayah Indonesia

Sumber-sumber gempa yang digunakan pada umumnya diklasifikasikan dalam tiga jenis zona sumber gempa, antara lain sebagai berikut (Hutapea and Mangape, 2009).

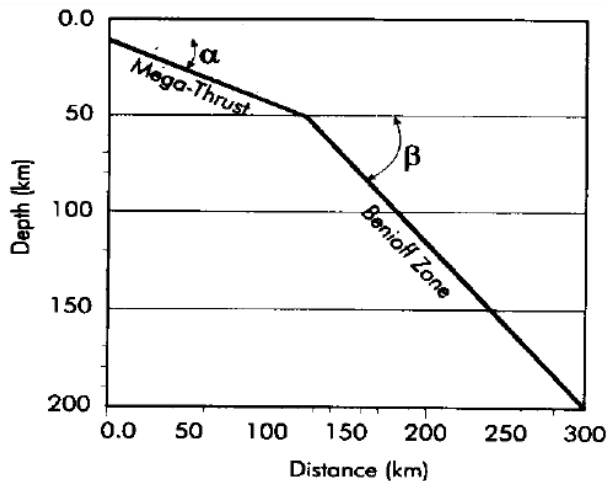
a. *Zona fault*

Zona kejadian gempa patahan (*fault*) yaitu zona kejadian gempa patahan dangkal (*Shallow Crustal Fault*) dengan mekanisme *reverse*, normal, atau *strike-slip* yang terjadi pada patahan-patahan yang sudah terdefinisi dengan jelas. Termasuk juga mengenai mekanisme, *slip-rate*, *dip*, panjang patahan, dan lokasinya. Sumber gempa dengan patahan dangkal, dimodelkan hingga kedalaman 15 km.

b. *Zona Subduksi*

Zona subduksi merupakan zona kejadian gempa yang terjadi di dekat batas pertemuan antara lempeng samudera yang menunjam masuk kebawah lempeng benua. Pada zona ini,

kejadian gempa yang terjadi akibat *thrust fault*, *normal fault*, *reverse slip*, dan *strike slip* yang terjadi di sepanjang pertemuan lempeng. Contoh dari zona subduksi yaitu zona *megathrust* yang merupakan sumber gempa subduksi dari permukaan hingga kedalaman 50 km. Sedangkan untuk sumber subduksi dengan kedalaman lebih dari 50 km (zona *benioff*) dimodelkan sebagai sumber *deep background*. Zona subduksi dibagi menjadi zona *megathrust/interplate* dan zona *benioff/intraslab*. Untuk zona *megathrust* memiliki kedalaman kurang dari 50 km sedangkan zona *benioff* memiliki kedalaman lebih dari 50 km (Sunardi, 2013). Besarnya sudut penunjaman zona *megathrust* dan zona *benioff* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Model zona *megathrust* dan zona *benioff* (Crouse, 1992)

#### c. Zona *background*

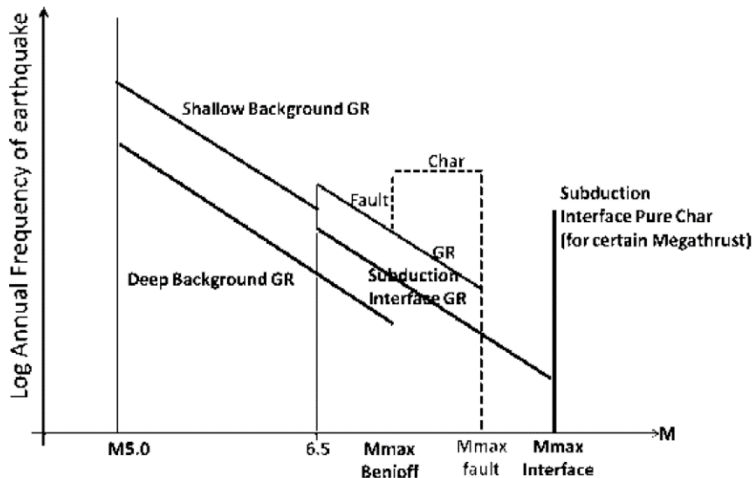
Zona *background* merupakan zona sumber gempa yang belum diketahui secara jelas, namun pada lokasi tersebut terjadi beberapa kejadian gempa. Sumber gempa *background* dibagi menjadi dua, yaitu dengan kedalaman hingga 50 km disebut *shallow background*, dan dengan kedalaman 50 km hingga 300 km termasuk dalam kategori *deep background*. Menurut (Petersen



et al., 2004), sumber gempa *benioff* merupakan bagian dari zona subduksi yang diyakini sebagai akibat dari tekanan lentur yang diterima oleh lempeng yang menunjam.

## 2.4 Karakterisasi Sumber Gempa

Secara matematis karakterisasi sumber gempa ditunjukkan dalam distribusi frekuensi kejadian gempa untuk setiap magnitudo dari masing-masing sumber gempa. Gambar 2.8 di bawah ini menunjukkan distribusi magnitudo dari berbagai sumber gempa.



Gambar 2.8 Distribusi magnitudo dari berbagai sumber gempa (Irsyam et al., 2010)

Distribusi ukuran gempa di zona sumber pada periode tertentu diperhitungkan dengan hukum pengulangan kejadian (*recurrence law*). Secara umum terdapat beberapa metode *recurrence law* yang digunakan dalam analisis *seismic hazard*, contohnya adalah metode keberulangan dari Gutenberg-Richter *recurrence law* dan *characteristic recurrence law*. Frekuensi kejadian gempa diperlukan dalam analisis kegempaan untuk mendapatkan karakteristik sumber gempa yang direpresentasikan

dalam parameter sumber gempa. Parameter sumber gempa tersebut meliputi parameter a-b dan magnitudo maksimum. Model matematik yang digunakan adalah *truncated exponential* dan *characteristic* untuk mendapatkan parameter a-b (Irsyam et al., 2010).

## 2.5 Analisis Potensi Bencana Alam

Analisis potensi bencana alam meliputi estimasi nilai percepatan gempa maksimum (PGA) dan respon spektra target di batuan dasar untuk periode ulang tertentu berdasarkan teori probabilitas total dengan memperhitungkan kemungkinan terlampauinya suatu gempa tertentu yang didefinisikan sebagai resiko tahunan (RA). Nilai dari resiko tahunan (RA) tersebut berbanding terbalik dengan periode ulang rata-rata. Sehingga, didapatkan hubungan sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.1 di bawah ini (Sunardi, 2013).

$$T = \frac{1}{R_A} \quad (2.1)$$

Resiko gempa adalah kemungkinan terlampauinya (*probability of exceedance*) suatu gempa dengan intensitas tertentu serta periode ulang rata-rata tertentu selama suatu masa bangunan. Resiko gempa dapat dinyatakan dalam bentuk sebagaimana pada persamaan 2.2 di bawah ini.

$$R_N = 1 - (1 - R_A)^N \quad (2.2)$$

dengan :

- R<sub>N</sub> = Resiko gempa
- R<sub>A</sub> = Resiko tahunan 1/T
- T = Periode ulang rata-rata gempa
- N = Masa guna bangunan

Peraturan terbaru mengenai bangunan internasional untuk bangunan tahan gempa sudah menggunakan peta *hazard* gempa dengan resiko terlampaui sebesar 2% selama masa bangunan 50

tahun atau setara dengan periode ulang gempa 2.475 tahun, seperti yang telah disebutkan pada NEHRP 1997, ASCE 7-98, dan IBC 2000 (Imran and Boediono, 2010).

Tabel 2.1 Hubungan dari parameter resiko gempa bumi (Susilo and Adnan, 2013).

<i>Annual Rate</i>	T (Periode)	Rn (Resiko Gempa)	N (Masa guna bangunan)
	(tahun)	(%)	(tahun)
0.0021050	475	10	50
0.0004040	2475	2	50
0.0002020	4950	2	100

## 2.6 Analisis *Seismic Hazard*

*Hazard* dapat didefinisikan sebagai bahaya atau ancaman. Dalam bidang seismologi, *hazard* dapat diartikan sebagai potensi bahaya atau ancaman yang merupakan hasil dari interaksi antara kejadian alam yang ekstrim (yang masih berupa potensi) dengan sistem lingkungan manusia (yang berupa realita). *Seismic hazard* (bahaya kegempaan) merupakan bahaya yang memiliki hubungan dengan aktivitas gempa di mana risikonya mengandung makna probabilitas terjadi kerugian materi maupun korban jiwa yang diakibatkan oleh suatu bencana alam tertentu. Resiko tersebut menghubungkan secara langsung antara kejadian bencana alam dengan kerugian yang diakibatkannya (Sunardi, 2013).

Analisa bahaya gempa memiliki tujuan untuk menentukan suatu batas intensitas gempa tertentu yang berlaku di daerah penelitian berdasarkan suatu nilai kemungkinan yang akan terjadi atau yang terlampaui pada suatu periode tertentu. Untuk melakukan analisis bahaya gempa perlu adanya pemahaman mengenai beberapa pengetahuan dan teori dasar yang berkaitan dengan seismotektonik, kegempaan, geologi, dan geoteknik. Pengetahuan dasar tersebut meliputi pengetahuan mengenai teori tektonik lempeng, teori *elastic rebound*, kondisi seismotektonik

wilayah penelitian, gambaran umum kondisi tektonik Indonesia, pengetahuan mengenai gempa dan gelombang seismik, identifikasi dan pemodelan sumber gempa, fungsi atenuasi, pengelolaan ketidakpastian menggunakan *logic tree*, analisis resiko gempa, serta analisis *hazard* gempa, distribusi magnitudo, jarak, dan parameter seismik terlampaui (Hutapea and Mangape, 2009; Sunardi, 2013).

*Seismic hazard* dan resiko seismik merupakan dua bentuk yang berbeda. *Seismic hazard* merupakan bentuk fisik dari bahaya itu sendiri, meliputi *ground motion*, pergeseran patahan, likuifaksi, dll, yang dapat menyebabkan suatu bahaya. Sedangkan untuk resiko seismik sendiri adalah kemungkinan dari kehilangan harta benda maupun menimbulkan korban jiwa yang merupakan akibat dari *seismic hazard*. Untuk meminimalisasi dampak dari bencana gempa yang ditimbulkan, diperlukan upaya mitigasi secara dini dan optimal. Salah satunya yaitu dengan membuat peta *hazard* gempa yang dapat berguna dalam perencanaan bangunan tahan gempa dan menggambarkan efek gempa pada suatu lokasi yang akan membantu dalam rangka mengantisipasi dan meminimalisasi korban jiwa maupun kerugian harta benda (Susilo and Adnan, 2013; Nugraha, 2014).

Dilakukannya analisis *hazard* gempa untuk memberikan estimasi kuantitatif dari guncangan gempa pada suatu lokasi tertentu. Analisa ini dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu secara deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*) dan secara probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Dalam metode deterministik, skenario kejadian gempa telah ditentukan. Skenario tersebut meliputi skenario mengenai kejadian gempa dengan magnitudo tertentu yang akan terjadi pada lokasi tertentu. Sedangkan untuk metode probabilistik dengan mempertimbangkan faktor ketidakpastian dalam magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa (Sunardi, 2013).

Secara umum, analisis dengan menggunakan pendekatan probabilistik dianggap lebih rasional dibandingkan dengan analisis deterministik. Hasil dari analisis dengan menggunakan

pendekatan probabilistik tersebut dapat digunakan langsung untuk memprediksi *hazard* gempa dari suatu lokasi yang berkaitan dengan konsekuensi terburuk yang mungkin dapat terjadi. Sampai saat ini, metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) masih digunakan oleh para perancang struktur untuk mendesain berbagai struktur tahan gempa. Pada prinsipnya, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* adalah metode deterministik yang analisisnya melibatkan banyak skenario, dan tidak hanya bersumber dari parameter seismik yang berasal dari *ground motion* terbesar. Metode ini digunakan dalam analisis bahaya seismik berdasarkan definisi dari fungsi distribusi probabilitas yang menggunakan ketidakpastian dari skala kejadian gempabumi, lokasi kejadian gempa, dan frekuensi kejadian gempa untuk mendapatkan level resiko kejadian gempa di lokasi penelitian (Susilo and Adnan, 2013; Makrup et al., 2009).

### **2.6.1 Metode Deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*)**

Dalam metode deterministik, dilakukan pembentukan skenario gempa tertentu di batuan dasar dengan memperhitungkan gempa yang terjadi pada suatu lokasi tertentu dalam besaran gempa tertentu. Skenario gempabumi ini berisi mengenai kejadian gempabumi dengan magnitudo tertentu yang akan terjadi pada lokasi tertentu. Metode ini mudah digunakan untuk memprediksi gerakan tanah (*ground motion*) akibat dari gempabumi, namun metode ini tidak mempertimbangkan pengaruh dari ketidakpastian terkait dalam analisis. Pada metode DSHA, biasanya mengikutsertakan keputusan serta pendapat subyektif dari para ahli, khususnya dalam penentuan potensi gempa. Akibatnya dalam hal ini terdapat kesulitan dalam pencapaian kesepakatan mengenai potensi gempa yang terjadi (Kumala and Wahyudi, 2016; Sunardi, 2013).

### 2.6.2 Metode Probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*)

Analisis probabilistik PSHA pada prinsipnya adalah analisis deterministik dengan menggunakan berbagai macam skenario dan didasarkan tidak hanya pada parameter gempa yang menghasilkan pergerakan tanah terbesar. Perbedaan utama antara analisis dengan menggunakan pendekatan DSHA dan PSHA adalah pada pendekatan PSHA frekuensi untuk tiap skenario pergerakan tanah yang akan terjadi juga ikut diperhitungkan. Sehingga pendekatan PSHA dapat digunakan untuk memprediksi seberapa besar probabilitas kondisi terburuk yang akan terjadi di daerah penelitian. Metode ini memungkinkan untuk memperhitungkan pengaruh faktor-faktor ketidakpastian dalam analisis, seperti ukuran, lokasi, dan frekuensi kejadian gempabumi. Metode ini memberikan kerangka kerja yang terarah. Oleh karena itu, faktor-faktor ketidakpastian dapat diidentifikasi, diperkirakan, dan selanjutnya digabungkan dengan metode pendekatan yang rasional untuk memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang kejadian gempa pada daerah penelitian (Irsyam et al., 2010).

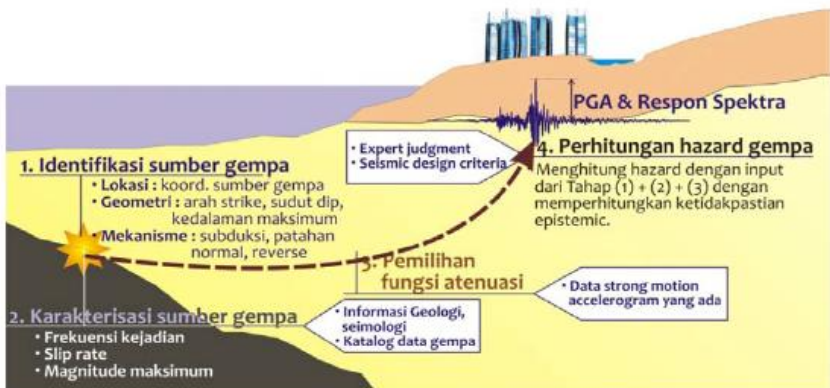
Menurut (McGuire, 2001), metode DSHA dan PSHA akan saling melengkapi tetapi tetap memberikan penekanan pada salah satu hasil. Hasil dari PSHA adalah kurva *hazard* atau *map* yang merepresentasikan nilai dari parameter kekuatan *ground motion* daerah penelitian yang memiliki probabilitas yang melampaui periode tertentu. Tiap hasil merupakan perhitungan yang terintegrasi dari semua gempabumi yang memiliki perbedaan ukuran, terjadi di zona sumber seismik yang berbeda dengan probabilitas kejadian yang berbeda pula (Convertito et al., 2006). Untuk keperluan desain infrastruktur tahan gempa, umumnya digunakan PSHA dengan tingkatan gempa atau probabilitas terlampaui mengikuti (SEAOC, 1997).

## 2.7 Teori *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA)

Model dan konsep dari analisis menggunakan metode probabilitas ini tetap digunakan hingga sekarang, namun dengan analisis dan teknik perhitungan yang terus dikembangkan. Menurut (EERI, 1989) metode ini memiliki empat tahapan, yaitu a) identifikasi sumber gempa, b) karakterisasi sumber gempa, c) pemilihan fungsi atenuasi, dan d) perhitungan *hazard* gempa. Teori PSHA mengasumsikan magnitudo gempabumi  $M$  dan jarak  $R$  adalah variabel acak kontinu dan independen (Susilo and Adnan, 2013). Dalam bentuk umum, teorema probabilitas total dapat dinyatakan dalam persamaan 2.3 di bawah ini.

$$P_X(x) = \int \int_{M R} P(X > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2.3)$$

di mana  $f_M(m)$  dan  $f_R(r)$  berturut-turut adalah fungsi kepadatan probabilitas magnitudo dan jarak,  $P(X > x | m, r)$  adalah probabilitas sebuah gempa dengan magnitudo  $m$  pada jarak  $r$  yang memberikan percepatan maksimum  $X$  di lokasi yang lebih tinggi dari  $x$ .



Gambar 2.9 Metode PSHA untuk mendapatkan nilai pergerakan tanah di batuan dasar (Irsyam et al., 2010)

## 2.8 Teori Ketidakpastian dalam PSHA

Identifikasi dan perhitungan ketidakpastian adalah perkembangan dari analisis *seismic hazard* modern. Pada studi mengenai *probabilistic seismic hazard*, keberagaman magnitudo, lokasi gempabumi, dan level *ground motion* dipertimbangkan secara eksplisit pada perhitungan komputasi dari *hazard*. Pada mayoritas penelitian mengenai *seismic hazard*, ketidakpastian pada model distribusi magnitudo gempabumi, lokasi, dan *ground motion* juga dipertimbangkan menggunakan *logic-tree* (Abrahamson and Bommer, 2005; Bommer, 2005).

Menurut (McGuire, 2004), ketidakpastian didefinisikan dalam dua kategori, antara lain:

- a. Ketidakpastian *aleatory* (*aleatory uncertainty*) merupakan ketidakpastian yang melekat dalam fenomena acak. Ketidakpastian ini dapat dikurangi dengan memberikan tambahan data maupun informasi. Dulu ketidakpastian ini dikenal dengan sebutan keacakan atau variabilitas melekat. Ketidakpastian *aleatory* menunjukkan ketidakpastian yang muncul dalam keacakan fenomena gempabumi, contohnya dalam persebaran yang diasosiasikan dengan *ground motion prediction equation* (GMPE). Ketidakpastian ini menjelaskan bahwa pembuat model tidak meramalkan kemungkinan dari mengurangi ketidakpastian *aleatory* itu sendiri (Farhadi and Mousavi, 2016). Contoh-contoh yang masuk dalam kategori ketidakpastian *aleatory* adalah (Sunardi, 2013):

- Magnitudo gempa dan properti gempa yang lain
- Lokasi gempa di masa yang akan datang
- Detail *fault rupture*
- Gerakan tanah pada suatu *site* yang memberikan nilai median gerakan tanah tersebut

- b. Ketidakpastian *epistemic* (*epistemic uncertainty*) merupakan ketidakpastian yang muncul karena kurangnya pengetahuan mengenai beberapa model sumber gempa atau parameter. Ketidakpastian ini dapat dikurangi, paling tidak secara



konseptual dengan penambahan data atau memperbaiki informasi. Dulu ketidakpastian ini dikenal dengan nama ketidakpastian statistik atau ketidakpastian profesional.

Dalam perhitungan probabilitas, tidak memberikan pertimbangan sistemik mengenai ketidakpastian dari nilai parameter pada suatu model *seismic hazard* tertentu. Sehingga dalam beberapa kasus pilihan terhadap salah satu elemen model *seismic hazard* tertentu dianggap kurang tepat. Ketidakpastian dari nilai parameter yang digunakan dan kekurangtepatan pemilihan model dalam *seismic hazard* ini merupakan bentuk dari ketidakpastian *epistemic* (Makrup et al., 2009).

Ketidakpastian *epistemic* muncul ketika pembuat model melihat adanya kemungkinan untuk mengurangi ketidakpastian itu dengan mengumpulkan data lebih banyak atau dengan memperbaiki model. Ketidakpastian *epistemic* muncul karena kurangnya pengetahuan dasar mengenai keberadaan atau karakteristik dari sumber gempa atau sumber seismik yang digunakan sebagai model. Tipe ketidakpastian ini menunjukkan kurang lengkapnya informasi dari gerakan seismik, kejadian gempa *historis*, dan karakteristik *rupture* (Farhadi and Mousavi, 2016).

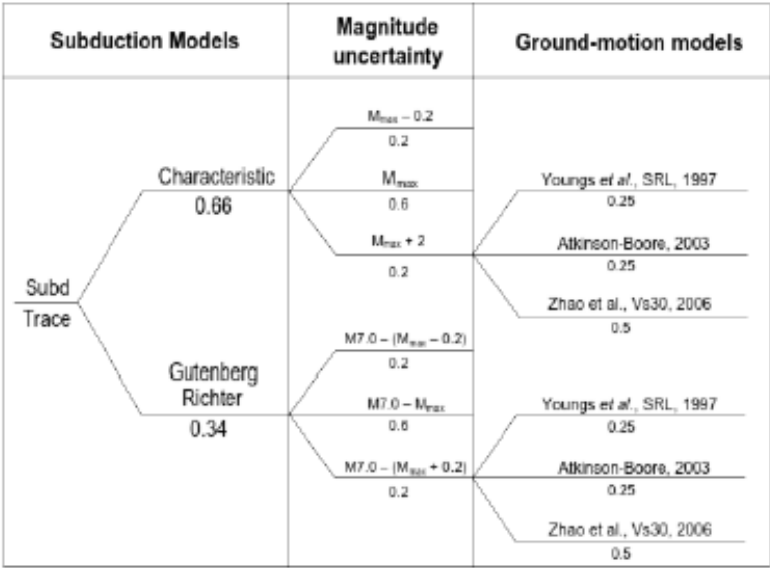
Contoh-contoh yang masuk dalam kategori ketidakpastian *epistemic* adalah (Sunardi, 2013):

- Geometri zona seismotektonik dan seismogenik
- Distribusi parameter sumber gempa (*a-value*, *b-value*, dan magnitudo maksimum)
- Batasan guncangan tanah
- Nilai median gerakan tanah yang memberikan properti sumber

## 2.9 Logic-Tree

*Logic-Tree* pertama kali diperkenalkan untuk analisis *seismic hazard* oleh (Kulkarni et al., 1984) dan menjadi alat yang populer pada analisis *seismic hazard*. *Logic-Tree* ini memperhitungkan seluruh ketidakpastian dalam menentukan

parameter-parameter dalam analisis *hazard* gempa dengan menggunakan probabilitas, antara lain yaitu fungsi atenuasi, pemilihan *recurrence model*, *reccurence rate*, dan magnitudo maksimum. Dengan menggunakan metode *logic-tree* ini kebebasan dalam menggunakan berbagai model lebih dapat dikontrol tingkat keakuratannya karena *logic-tree* memberikan faktor bobot yang berbeda-beda untuk masing-masing model. Sehingga antara model satu dengan model yang lainnya dapat dilakukan komparasi akurasi. Dengan menggunakan metode *logic-tree* ini setiap alternatif yang dipilih dalam menentukan parameter-parameter tersebut diberi suatu bobot yang menggambarkan tingkat kepercayaan terhadap parameter yang digunakan. Jumlah faktor bobot dari semua alternatif metode untuk parameter yang sama harus sama dengan satu (Sunardi, 2013). Gambar 2.10 di bawah ini merupakan bentuk dari *logic-tree*.



Gambar 2.10 Contoh *logic-tree* yang digunakan dalam analisis *seismic hazard* (Kramer, 1996)

Dalam menggunakan *logic-tree*, satu analisa *seismic hazard* diselesaikan untuk kombinasi model atau parameter yang berkaitan dengan tiap ujung cabang. Dari tiap hasil, analisis diberikan oleh nilai bobot kemungkinan relatif dari kombinasi cabang, dengan hasil akhir diambil sebagai penjumlahan dari nilai bobot masing-masing. Dapat dilihat dengan mudah bahwa kebutuhan usaha perhitungan bertambah dengan cepat seiring dengan bertambahnya jumlah node dan cabang. Parameter yang dikarakterisasikan dengan baik oleh distribusi kontinu sulit untuk dikelola dengan *logic-tree* tanpa memilih kembali sejumlah besar cabang-cabang. Sehingga, *logic-tree* dapat dikatakan sangat berguna untuk analisis *seismic hazard* (Makrup et al., 2009).

## 2.10 Fungsi Atenuasi

Fungsi atenuasi merupakan persamaan matematika sederhana yang menghubungkan antara parameter kegempaan di lokasi pusat gempa (Magnitudo  $M$  dan jarak  $R$ ) dengan parameter pergerakan tanah (spektra percepatan) pada lokasi yang ditinjau (Campbell, 2003). Fungsi atenuasi adalah suatu fungsi khas yang diturunkan dari data gempa pada suatu daerah tertentu. Salah satu data yang digunakan untuk menurunkan fungsi atenuasi adalah data *time history* yang diperoleh dari hasil pencatatan alat *accelerograph* saat kejadian. Penurunan semua model atenuasi didasarkan atas analisis statistik dan gerakan tanah terekam.

Beberapa peneliti telah mempublikasikan beberapa fungsi atenuasi berdasarkan dengan catatan gempa yang pernah terjadi di suatu lokasi. Di Indonesia, karena minimnya data pencatatan *time history*, pemakaian fungsi atenuasi yang diturunkan di negara lain tidak dapat dihindari. Penentuan fungsi atenuasi didasarkan pada persamaan kondisi geologi dan tektonik dari wilayah di mana fungsi atenuasi tersebut dibuat (Sunardi, 2013). Pada pemilihan fungsi atenuasi, pada dasarnya yang paling penting adalah berdasarkan mekanisme kejadian gempa, yang secara umum

dikategorikan dalam zona gempa subduksi (zona gempa *background* dan zona gempa *shallow crustal*).

Pada umumnya, fungsi atenuasi tergantung pada faktor-faktor sebagaimana berikut ini (Hutapea and Mangape, 2009):

- Jarak episenter
- Kondisi lapisan kulit bumi yang dilintasi gelombang gempa
- Tipe mekanisme sumber gempa daerah penelitian
- Kondisi tanah lokal di sekitar lokasi penelitian

Model atenuasi yang telah didapat dari penurunan dapat di *update* saat data rekaman gerakan tanah terbaru telah tersedia. Bentuk *updating* beberapa fungsi atenuasi yang telah ada dapat dilihat dengan munculnya model atenuasi tahun 2006/2007 dalam kelompok *Next Generation Attenuation* (NGA). Model atenuasi yang termasuk dalam kelompok ini antara lain Boore and Atkinson (2006), Campbell and Bozorgnia (2006), Chiou and Youngs (2006), Boore and Atkinson PEER-NGA (2007), Idriss (2007), dan Abrahamson dan Silva (2007) (Makrup et al., 2009).

### 2.10.1 Fungsi Atenuasi Abrahamson and Silva (1997)

Fungsi atenuasi (Abrahamson and Silva, 1997) ini diturunkan berdasarkan 655 data dari 58 gempabumi. Hubungan atenuasi ini berupa respon spektra yang diturunkan dari nilai rata-rata komponen vertikal dan horizontal pada gempa dangkal dalam daerah tektonik aktif. Fungsi atenuasi ini dapat digunakan pada semua tempat di seluruh dunia. Persamaan dari fungsi atenuasi ini sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.4 berikut.

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + Ff_3(M) + HWf_4(M, R_{rup}) + Sf_5 \ln(pga_{rock}) \quad (2.4)$$

dengan

$$\varepsilon \approx N(0, \sigma_\varepsilon^2)$$

$$Sa(g) = \text{spektra percepatan (g)}$$

$$R_{rup} = \text{jarak terdekat ke bidang rupture (km)}$$

$$M = \text{magnitudo momen}$$

- F = tipe *fault* (nilai F = 1 untuk *reverse*, F = 0.5 untuk *reverse/oblique*, dan F = 0 untuk tipe *fault* yang lain)
- HW = *variable dummy* untuk site *hanging wall* (nilai HW = 1 untuk site di atas *hanging wall* dan HW = 0 untuk kondisi site yang lain)
- S = *variable dummy* untuk klas site (nilai S = 0 untuk *rock* dan tanah dangkal dan S= 1 untuk tanah dalam)

dengan nilai  $f_1$  adalah sebagaimana pada persamaan 2.5 di bawah ini.

$$f_1(M, R_{rup}) = a_1 + b(M + c_1) + a_{12}(8.4 - M)^n + [a_3 + a_{13}(M - c_1)] \ln R \quad (2.5)$$

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 - c_4^2} \quad (2.6)$$

$b = a_1$  untuk  $M > c_1$  dan  $b = a_4$  untuk  $M < c_1$

untuk nilai  $f_3$  sebagaimana pada persamaan 2.7 di bawah ini.

$$f_3(M) = \begin{cases} a_5 & M \leq 5.8 \\ a_5 + \frac{(a_6 - a_5)(M - 5.8)}{c_1 - 5.8} a_5 & 5.8 < M < c_1 \\ a_5 & M \geq c_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

untuk nilai  $f_4$  yaitu pada persamaan 2.8 di bawah ini.

$$f_4(M, R_{rup}) = f_{HW}(M) f_{HW}(R_{rup}) \quad (2.8)$$

$$f_{HW}(R_{rup}) = \begin{cases} 0 & R_{rup} < 4 \\ a_9 = \frac{R_{rup} - 4}{4} & 4 < R_{rup} < 8 \\ a_9 & 8 < R_{rup} < 18 \\ a_9 = \left(1 - \frac{R_{rup} - 18}{7}\right) & 18 < R_{rup} < 24 \\ 0 & R_{rup} > 24 \end{cases} \quad (2.9)$$

dan nilai  $f_5$  adalah sebagaimana pada persamaan 2.10 di bawah ini.

$$f_5(PGA_{rock}) = a_{10} + a_{11} \ln(PGA_{rock} + c_5) \quad (2.10)$$

$$PGf_{HW}(M) = \begin{cases} 0 & M \leq 5.5 \\ M - 5.5 & 5.5 < M < 6.5 \\ 1 & M \geq 6.5 \end{cases} \quad (2.11)$$

$A_{rock}$  = percepatan puncak yang diharapkan terjadi pada batuan dasar dalam satuan g (gravitasi) yang dapat ditentukan dengan fungsi atenuasi persamaan (2.4) dengan memberi nilai  $S = 0$ .

$$\sigma_{total}(M) = \begin{cases} b_5 & M \leq 5 \\ b_5 - b_6(M - 5) & 5 < M < 7 \\ b_5 - 2b_6 & M \geq 7 \end{cases} \quad (2.12)$$

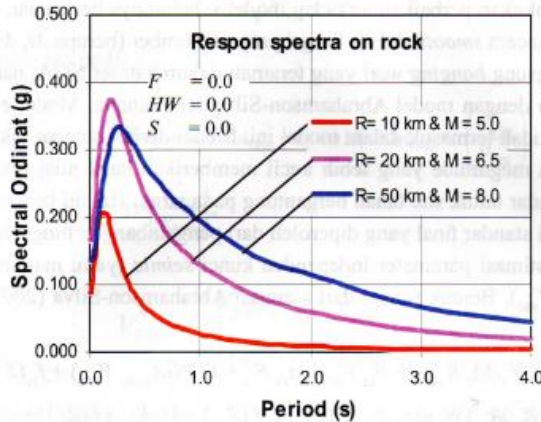
Model gerakan tanah empirik (Abrahamson and Silva, 1997) dapat diaplikasikan dalam rentang parameter berikut.

$$M = 4.4 - 8.0$$

$$P_{\rho v \pi} = 0 - 300 \kappa \mu$$

Untuk fungsi atenuasi (Abrahamson and Silva, 1997) didapatkan hubungan *spectral ordinat* dengan *period*

sebagaimana pada kurva yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut.

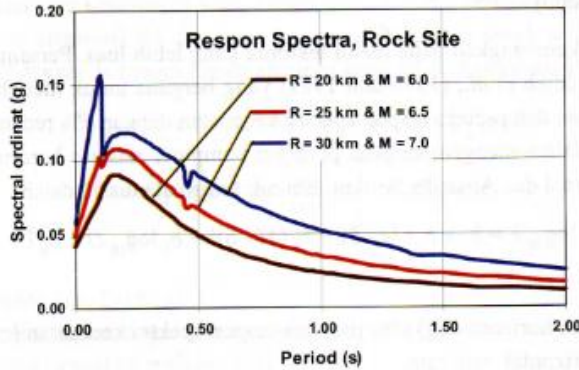


Gambar 2.11 Spektra atenuasi (Abrahamson and Silva, 1997)

### 2.10.2 Fungsi Atenuasi Spudich et al., (1997/99)

(Spudich et al., 1997) memberikan hubungan prediksi untuk menentukan percepatan tanah puncak horizontal dan pseudo-respon spektra percepatan dengan 5% redaman, di mana persamaan tersebut cocok digunakan untuk memprediksi gerakan tanah gempa pada regim tektonik ekstensional. Hubungan empirik ini merupakan hubungan terbaru dari hubungan yang sebelumnya telah diturunkan oleh (Spudich et al., 1996) yaitu Sea96. Selanjutnya revisi terbaru oleh (Spudich et al., 1999) meluncurkan Sea99 yang merupakan hubungan prediksi terevisi dari Sea96. Kegunaan atenuasi ini sama dengan Sea96 yaitu untuk menentukan percepatan tanah puncak horizontal dan pseudo-respon spektra kecepatan dengan redaman 5% yang tepat digunakan dalam estimasi gerakan tanah gempa pada rezim tektonik ekstensional dan juga rezim tektonik yang lain.

Untuk fungsi atenuasi (Spudich et al., 1997) didapatkan hubungan *spectral ordinat* dengan *period* sebagaimana pada kurva yang ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Spektra atenuasi Spudich et al. (1997/99)

Persamaan atenuasi (Spudich et al., 1997) adalah sebagaimana pada persamaan 2.13 berikut ini.

$$\log_{10} Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4 R + b_5 \log_{10} R + b_6 \Gamma \quad (2.13)$$

dengan

Y = percepatan puncak horizontal (g) atau pseudo-respon spektra kecepatan (cm/dt) untuk 5% redaman komponen horizontal rata-rata.

M = magnitudo momen

$\Gamma$  = 0 untuk batuan dan 1 untuk tanah

R =  $\sqrt{r_{jb}^2 + h^2}$ ,  $r_{jb}$  = jarak Joyner-Boore

Dan untuk persamaan atenuasi (Spudich et al., 1999) adalah sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan 2.14 berikut.

$$\log_{10} Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \log_{10} D + b_6 \Gamma \quad (2.14)$$

dengan

Y = percepatan puncak horizontal (g) atau pseudo-respon spektra kecepatan (cm/dt) untuk 5% redaman komponen horizontal rata-rata.



M	= magnitudo momen
$\Gamma$	= 0 untuk batuan dan 1 untuk tanah
D	= $\sqrt{r_{jb}^2 + h^2}$ , $r_{jb}$ = jarak Joyner-Boore

### 2.10.3 Fungsi Atenuasi Youngs et al. (1997)

Hubungan atenuasi yang dirumuskan oleh (Youngs et al., 1997) merupakan fungsi atenuasi empirik yang dapat digunakan untuk memprediksi percepatan tanah puncak dan percepatan respon spektra pada kejadian gempa zona subduksi *interface* dan *intraslab* dengan nilai magnitudo momen lebih besar sama dengan 5.0 dan jarak dari site ke sumber gempa dalam bentuk jarak *rupture* 10-500 km. Hubungan atenuasi ini dikembangkan dengan menggunakan analisis regresi.

Bentuk dari fungsi atenuasi (Youngs et al., 1997) adalah sebagaimana pada persamaan 2.15 dan 2.16 berikut.

Untuk batuan

$$\ln y = 0.2148 + 1.414M + C_1 + C_2(10 + M)^3 - C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (2.15)$$

$$\text{Standard Deviation : } \sigma_{\ln y} = C_4 + C_5M \quad (2.17)$$

Untuk tanah

$$\ln y = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 + M)^3 - C_3 \ln(r_{rup} + 1.097e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (2.16)$$

$$\text{Standard Deviation : } \sigma_{\ln y} = C_4 + C_5M \quad (2.17)$$

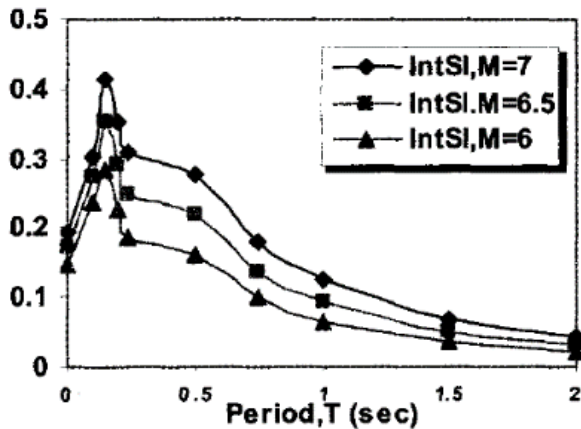
dengan

y	= percepatan spektra (g)
M	= magnitudo momen ( $M \geq 5$ )
H	= kedalaman (km)
$Z_T$	= tipe sumber (0 untuk kejadian <i>interface</i> dan 1 untuk kejadian <i>intraslab</i> )

$R$  dan  $r_{rup}$  = jarak terdekat ke *rupture* (km) ( $10 \text{ km} \leq R_{rup} \leq 500 \text{ km}$ ).

Fungsi atenuasi ini hanya berlaku untuk sumber gempa zona subduksi (Youngs et al., 1997).

Didapatkan hubungan *spectral ordinat* dengan *period* sebagaimana pada kurva yang ditunjukkan pada gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Spektra atenuasi (Youngs et al., 1997)

#### 2.10.4 Fungsi Atenuasi Garcia (2005)

Persamaan atenuasi yang dirumuskan oleh (Garcia, 2005) merupakan persamaan untuk memprediksi respon spektra *pseudoacceleration* (damping 5%), PGA, PGV pada area yang bebas dari batuan untuk kedalaman sedang, untuk gempabumi akibat *inslab* patahan turun. Penelitian yang dilakukan oleh (Garcia, 2005) yaitu pada wilayah Mexico berdasarkan dengan analisis regresi *maximum-likelihood*. Metode ini memungkinkan untuk korelasi antara subset dari residu dan memberikan ketentuan tambahan yang sesuai untuk respon spektra. Model atenuasi ini merumuskan persamaan regresi menjadi dua komponen, yaitu komponen horizontal dan komponen vertikal.

Bentuk dari fungsi atenuasi (Garcia, 2005) adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.18 di bawah ini.

$$\log Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 R - c_4 \log R + c_5 H + \sigma \quad (2.18)$$

Serta persamaan standard deviasi residual adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.19 di bawah ini.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2} \quad (2.19)$$

dengan

Y = rata-rata kuadrat dari komponen vertikal dan horizontal dengan damping PSA 5% pada cm/dt.

M<sub>w</sub> = magnitudo momen

H = kedalaman fokal (km)

c<sub>i</sub> = koefisien yang ditentukan dari analisis regresi

$$R = \sqrt{R_{cld}^2 + \Delta^2}$$

R<sub>cld</sub> = jarak terdekat ke patahan untuk event terbesar (km)  
(M<sub>w</sub>>6.5)

Δ = nilai saturasi yang dekat dengan sumber yang didefinisikan secara analitis oleh Atkinson and Boore (2003) berdasarkan pertimbangan geometrinya (Δ = 0.00750 · 10<sup>0.507M<sub>w</sub></sup>).

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Daerah dan Waktu Penelitian**

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari hingga Maret 2017 bertempat di Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta di bidang Geofisika dan selanjutnya dilakukan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam penelitian ini dilakukan analisis bahaya (*hazard*) gempa untuk wilayah Malang dengan batas koordinat  $3,6^{\circ}$  -  $12,65^{\circ}$  LS dan  $108,2^{\circ}$  -  $117,2^{\circ}$  BT.

#### **3.2 Pengumpulan Data**

Dalam penelitian bahaya gempa di wilayah Malang digunakan data gempa tahun 1900 hingga 2017. Data gempa diambil dari katalog lembaga yang melakukan pengamatan kegempaan baik nasional maupun internasional yaitu Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan Katalog *United States Geological Survey* (USGS) yang terdiri dari NEIC, NOAA, PDQ, dan gabungan katalog ANSS (*The Advanced National Seismic System*). Data katalog BMKG yang digunakan memiliki batas koordinat  $3,6^{\circ}$  -  $12,65^{\circ}$  LS dan  $108,2^{\circ}$  -  $117,2^{\circ}$  BT dan data katalog USGS memiliki pusat koordinat -  $8,152^{\circ}$  LS dan  $112,691^{\circ}$  BT dengan radius 500 km dan batas kedalaman maksimum hingga 300 km.

#### **3.3 Tahapan Penelitian**

##### **3.3.1 Penyeragaman Skala Magnitudo**

Data gempabumi yang dikumpulkan dari berbagai sumber menggunakan skala magnitudo yang berbeda-beda, seperti magnitudo lokal (mL), magnitudo *body* (mb), magnitudo *surface* (ms), dan magnitudo momen (Mw). Skala magnitudo

tersebut dikonversi terlebih dahulu menjadi satu skala magnitudo yang sama. Pada penelitian ini digunakan skala magnitudo momen ( $M_w$ ). Konversi skala magnitudo yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada korelasi beberapa magnitudo untuk wilayah Indonesia sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3.1 Korelasi konversi beberapa skala magnitudo untuk wilayah Indonesia (Irsyam et al., 2010).

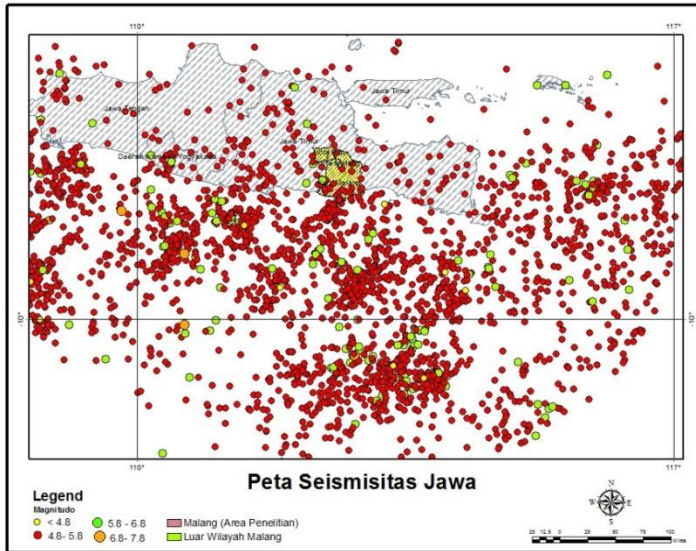
Korelasi Konversi	Jml Data (Events)	Range Data	Kesesuaian ( $R^2$ )
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051M_s + 7.285$	3.173	$4.5 \leq M_s \leq 8.6$	93.9%
$M_w = 0.114m_b^2 - 0.556m_b + 5.560$	978	$4.9 \leq m_b \leq 8.2$	72.0%
$M_w = 0.787M_E + 1.537$	154	$5.2 \leq M_E \leq 7.3$	71.2%
$m_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$	722	$3.0 \leq M_L \leq 6.2$	56.1%
$M_L = 0.717M_D + 1.003$	384	$3.0 \leq M_D \leq 5.8$	29.1%

### 3.3.2 Declustering

Sebelum analisis bahaya gempa di daerah penelitian, perlu dilakukan proses *declustering*. *Declustering* merupakan proses pemisahan antara gempa utama (*foreshock*) dan gempa susulan (*aftershock*) dengan menggunakan kriteria rentang waktu dan jarak. Setelah dilakukan pengumpulan data dan penyeragaman skala magnitudo, selanjutnya dilakukan pemisahan gempa utama dan gempa susulan. Analisis bahaya gempa probabilistik dilakukan berdasarkan kejadian gempa independen atau gempa utama. Kejadian-kejadian gempa dependen atau gempa susulan, seperti *foreshock* dan *aftershock* yang terjadi dalam suatu rangkaian gempa harus diidentifikasi sebelum melakukan analisis. Memasukkan kejadian gempa dependen dalam analisis akan mengakibatkan sedikit peningkatan pada hasil analisis resiko gempa (Pacheco and Sykes, 1992).

Pada penelitian ini, kriteria yang digunakan untuk *declustering* adalah kriteria dari Reasenberg untuk mengeliminasi *before shock* dan *aftershock* dari katalog gempa. Penggambaran

data katalog gempa yang digunakan dalam penelitian ini untuk beberapa variasi magnitudo dapat dilihat pada gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Data Gempa Utama dengan Radius 500 km dari Pusat Koordinat wilayah Malang ( $-8.152^{\circ}$  LS dan  $112.691^{\circ}$  BT) dari tahun 1900 hingga 2017.

### 3.3.3 Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa

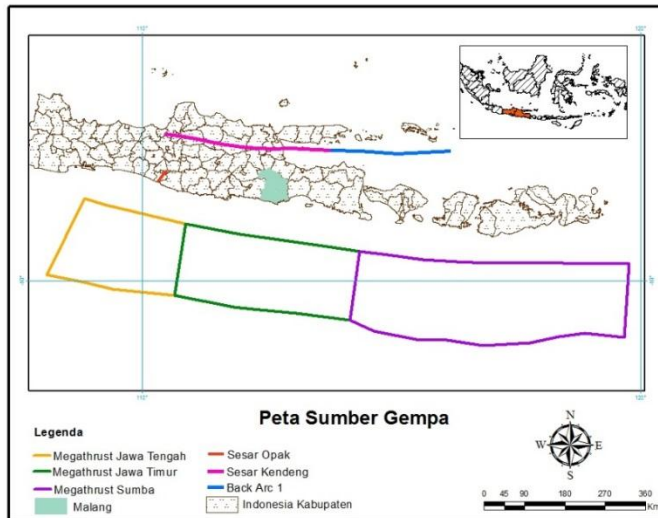
Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang memiliki derajat gempa yang sama, di mana di setiap titik dalam zona tersebut memiliki kemungkinan yang sama terjadinya gempa di masa mendatang. Pemodelan zona sumber gempa dilakukan dengan menginterpretasi kondisi geologi, geofisika, dan seismotektonik berdasarkan katalog kejadian gempa. Model sumber gempa tersebut akan memberikan gambaran distribusi episenter kejadian gempa historik, frekuensi kejadian gempa, dan pergeseran relatif lempeng (*slip rate*) suatu sumber gempa. Model sumber gempa diperlukan sebagai hubungan antara data kejadian

gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa (Irsyam et al., 2010).

Pada penelitian ini, batasan pemodelan zona sumber gempa yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dibatasi dengan radius hingga 500 km.
2. Kedalaman sumber gempa yang digunakan dibatasi hingga 300 km.
3. Digunakan fungsi atenuasi untuk tiap-tiap model sumber gempa yang dianggap sesuai dengan karakterisasi kegempaan dan model sumber gempa di wilayah Indonesia.

Pada penelitian ini, daerah pengaruh yang diambil adalah radius 500 km dari pusat koordinat wilayah Malang, dengan asumsi bahwa kejadian-kejadian gempa yang terjadi di luar jarak tersebut tidak memberikan kontribusi yang berarti. Pemodelan zona sumber gempa yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pemodelan Sumber Gempa



Sumber gempa yang digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan dalam tiga jenis model sumber gempa, antara lain sumber gempa *fault*, sumber gempa subduksi, dan sumber gempa *background*.

1. Zona sumber gempa patahan (*fault*)

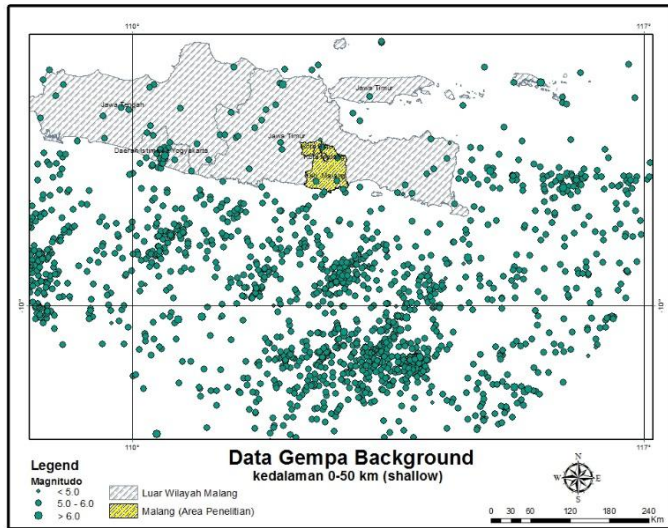
Zona gempa patahan merupakan zona gempa dengan kejadian gempa dangkal (*shallow crustal fault*). Patahan-patahan yang digunakan merupakan patahan-patahan yang sudah dikarakterisasi dengan jelas, termasuk mengenai mekanisme, *dip*, *slip rate*, panjang patahan, magnitudo maksimum maupun lokasinya. Untuk sumber gempa *fault* dimodelkan dengan kedalaman hingga 20 km (Hutapea and Mangape, 2009).

2. Zona sumber gempa subduksi (*megathrust*)

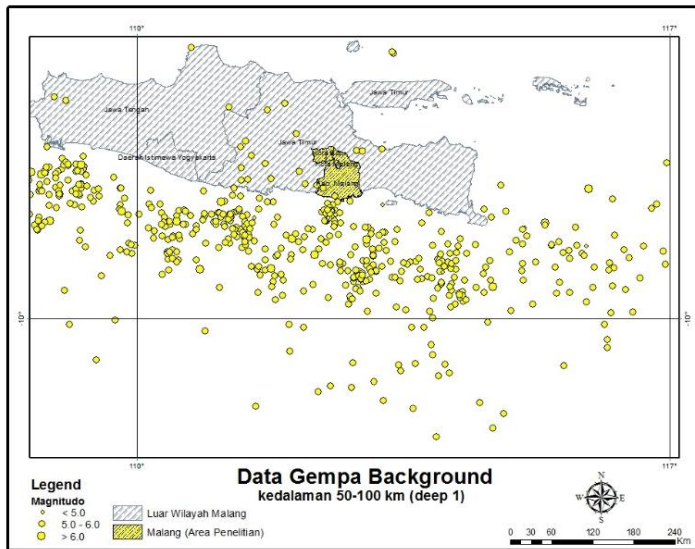
Zona *megathrust* merupakan zona sumber gempa yang terjadi di dekat batas pertemuan antara lempeng samudera yang menunjam masuk ke bawah lempeng benua. Dalam penelitian ini zona subduksi yang dimaksud adalah zona *megathrust*. Kejadian gempa akibat *thrust fault*, *reverse fault*, *normal fault*, dan *strike slip* yang terjadi di sepanjang pertemuan lempeng dapat diklasifikasikan sebagai zona subduksi. Sumber gempa *megathrust* yang digunakan hingga kedalaman 50 km. Untuk kedalaman lebih dari 50 km akan dimodelkan sebagai sumber gempa *deep background*.

3. Zona sumber gempa *background*

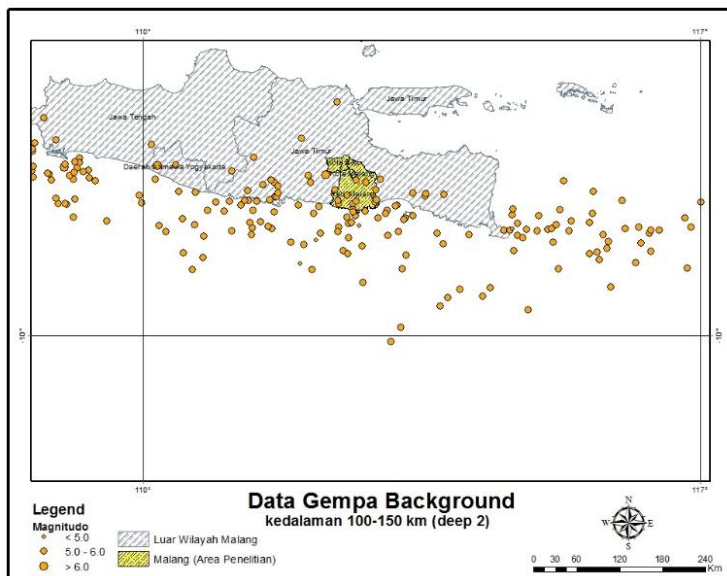
Sumber gempa *background* merupakan sumber gempa yang belum diketahui secara jelas, namun pada tempat tersebut didapati adanya beberapa kejadian gempa (kejadian gempa yang belum diketahui sesarnya). Sumber gempa *background* dibagi menjadi dua berdasarkan kedalamannya, yaitu *shallow background* untuk kedalaman hingga 50 km dan *deep background* untuk kedalaman 50 hingga 300 km. Pemodelan dengan menggunakan sumber gempa *background* ditunjukkan pada Gambar 3.3.



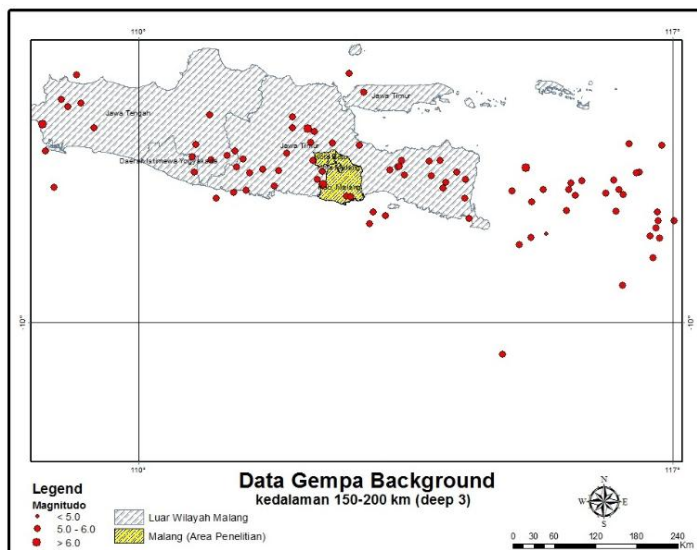
a



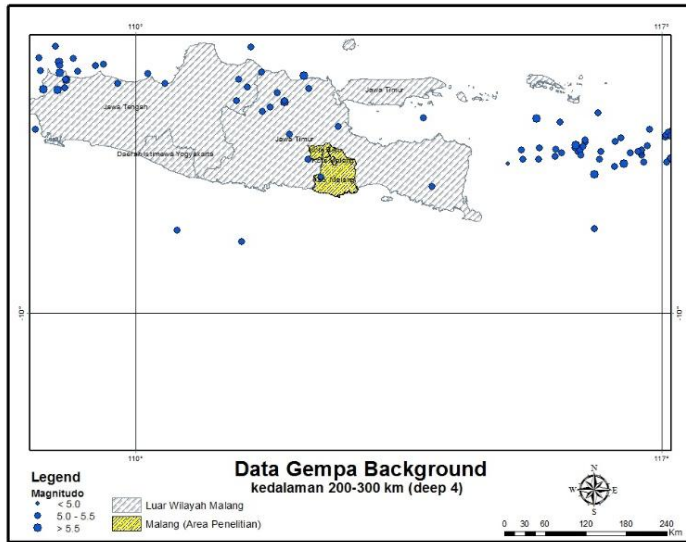
b



C



d



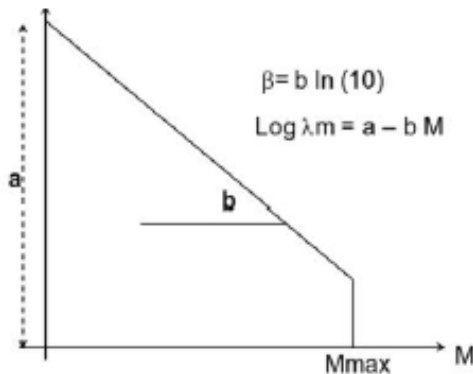
e

Gambar 3.3 Data gempa untuk model *shallow background* (a), *deep 1* (b), *deep 2* (c), *deep 3* (d), dan *deep 4* (e)

### 3.3.4 Karakterisasi Sumber Gempa

Aktivitas dan karakteristik kegempaan suatu wilayah tercermin dari parameter seismik yang digunakan dalam analisis bahaya gempa. Dalam analisis bahaya gempa, parameter yang digunakan antara lain *recurrence rate*, nilai-*b*, *slip rate*, dan magnitudo maksimum. Dalam penelitian ini, karakteristik sumber gempa ditentukan dengan menggunakan model *recurrence* Gutenberg-Richter dengan memberikan pembobotan untuk masing-masing model. Model keberulangan (*recurrence model*) yang paling banyak digunakan adalah model eksponensial yang diekspresikan dengan garis *b* dari (Gutenberg and Richter, 1944). Kedua peneliti ini melakukan studi terhadap kumpulan data di California bagian selatan. Gutenberg-Richter mendefinisikan tentang laju tahunan rata-rata terlampaui (*the mean annual rate of exceedance*)  $\lambda_m$ . Nilai logaritma  $\lambda_m$  terhadap magnitudo *M*

selanjutnya digambarkan, hasil penggambaran ini akan memberikan bentuk hubungan yang mendekati linier seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Bentuk tipikal dari garis Gutenberg-Richter

Untuk perhitungan nilai  $a$  dan  $b$  dalam model distribusi magnitudo Gutenberg-Richter dilakukan dengan cara mengambil data-data gempa historis yang ada di daerah sumber gempa tersebut, lalu dilakukan analisis statistika dengan model *maximum likelihood*. Untuk penentuan nilai  $a$  dan  $b$  dari masing-masing model sumber gempa diestimasi dengan bantuan program ZMAP (Sunardi, 2013). Karakterisasi sumber gempa yang digunakan untuk analisis bahaya gempa di wilayah Malang ditunjukkan pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Data dan parameter sumber gempa subduksi (Irsyam et al., 2010)

<i>Megathrust</i>	<i>Mmax History</i>	Nilai $b$	Nilai $a$	<i>Mmax (Desain)</i>
				GR
Jawa Tengah	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1
Jawa Timur	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1
Sumba	7.8 (11-087)-193	1.200	6.81	7.8

Tabel 3.3 Data dan parameter sumber gempa *fault* (Irsyam et al., 2010; Koulali et al., 2016)

<i>Fault</i>	<i>Slip Rate</i>		<i>Sense Mechanism</i>	<i>Dip</i>	<i>Top</i>	<i>Bottom</i>	<i>L (km)</i>	<i>Mmax</i>
<i>Name</i>	<i>Mm/year</i>	<i>weight</i>						
Opak	2.4	1	<i>Strike-slip</i>	90	3	18	31.6	6.8
Kending	5	1	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	300	7.5
Back Arc 1	28	1	<i>Reverse slip</i>	45	3	20	268	7.8

### 3.3.5 Penentuan Fungsi Atenuasi

Dalam menurunkan fungsi atenuasi diperlukan data percepatan tanah yang banyak supaya didapatkan suatu fungsi atenuasi yang sesuai untuk daerah penelitian. Di wilayah Indonesia, ketersediaan data percepatan tanah masih belum cukup untuk menghasilkan suatu fungsi atenuasi yang baik. Oleh karena itu, untuk analisis bahaya dapat menggunakan fungsi atenuasi yang diturunkan dari wilayah lain yang memiliki kemiripan kondisi tektonik dan geologi di Indonesia. Pemilihan fungsi atenuasi yang digunakan harus didasarkan pada mekanisme sumber gempa yang digunakan (Sunardi, 2013).

Pada penelitian ini, fungsi atenuasi yang digunakan telah dikelompokkan berdasarkan mekanisme sumber gempa yang secara umum dibagi ke dalam beberapa klasifikasi. Klasifikasi yang digunakan yaitu zona sumber gempa subduksi, zona sumber gempa *fault*, dan zona sumber gempa *background* yang terdiri atas *shallow background* dan *deep background*. Penggunaan fungsi atenuasi berdasarkan klasifikasi sumber gempa ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Fungsi Atenuasi yang digunakan pada wilayah penelitian

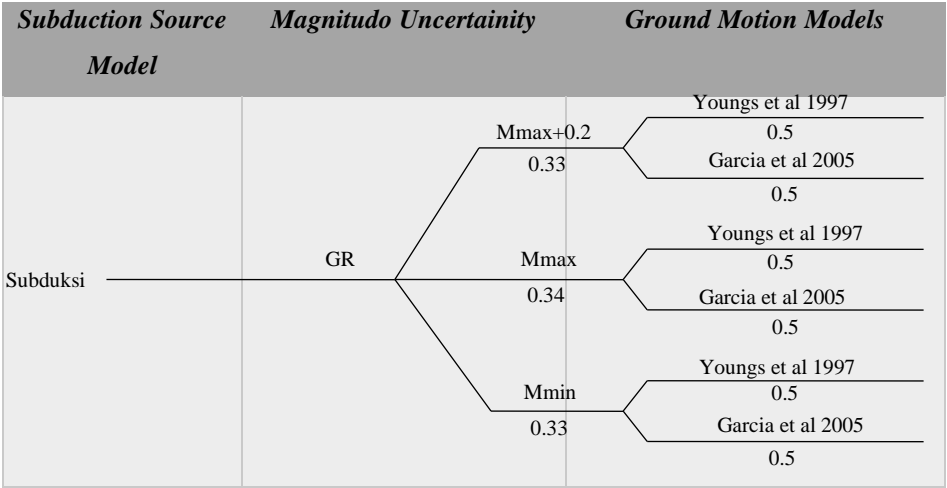
<b>Model Sumber Gempa</b>	<b>Atenuasi</b>
Subduksi	Youngs et al. (1997)

	Garcia et al. (2005)
<i>Fault</i>	Abrahamson & Silva (1997)
	SEA99 (1997)
<i>Background</i>	Youngs et al (1997)
	Garcia et al (2005)

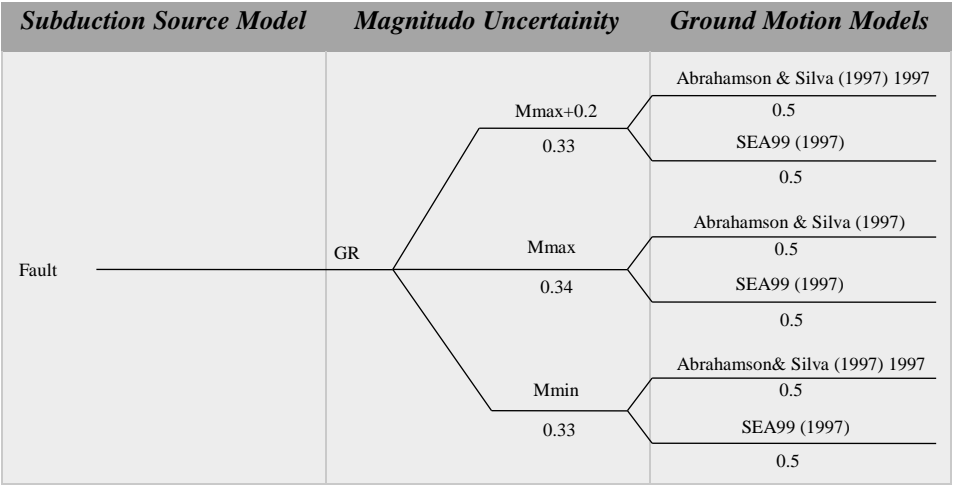
### 3.3.6 Logic-tree

Pendekatan *logic-tree* dilakukan dengan tujuan untuk menentukan pembobotan pada masing-masing parameter yang digunakan pada analisis bahaya gempa dan menggambarkan sistem penentuan tingkat kepercayaan parameter yang digunakan. Selain itu, *logic-tree* juga memasukkan faktor ketidakpastian pada analisis bahaya gempa. Dalam penelitian ini, sumber gempa subduksi dan *fault*, pembobotan dilakukan dengan menggunakan fungsi atenuasi yang berbeda. Pemakaian *logic-tree* dalam PSHA sangat diperlukan akibat adanya faktor ketidakpastian dalam pengelolaan data untuk analisis *seismic hazard*. Dengan menggunakan model *treatment* ini, data, parameter, serta model atenuasi yang digunakan bisa diakomodir dengan bobot sesuai dengan ketidakpastiannya (Irsyam et al., 2010).

Model *logic-tree* yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan model sumber gempa yang digunakan. Model *logic-tree* untuk sumber gempa subduksi, *fault*, dan *background* ditunjukkan sebagaimana pada gambar 3.5, 3.6, 3.7. Model *logic-tree* terdiri dari rangkaian *node* yang direpresentasikan sebagai titik di mana model dispesifikan dan cabang yang merepresentasikan model yang berbeda yang dispesifikasikan pada tiap *node*. Penjumlahan probabilitas dari semua cabang yang dihubungkan dengan satu *node* nilainya harus sama dengan 1. Hasil dari tiap analisis diberikan oleh nilai bobot kemungkinan relatif dari kombinasi cabang, dengan hasil akhir diambil sebagai penjumlahan dari nilai bobot masing-masing.

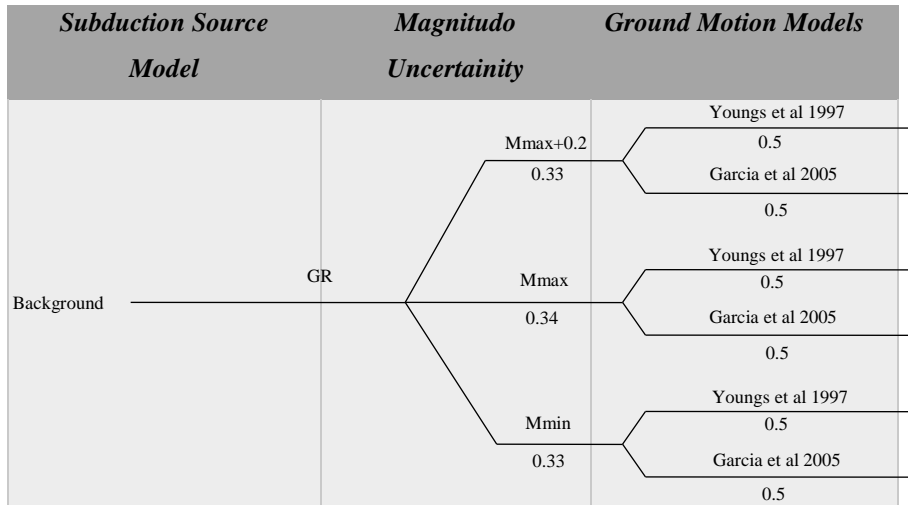


Gambar 3.5 Model *logic tree* sumber gempa subduksi.



Gambar 3.6 Model *logic tree* sumber gempa *fault*





Gambar 3.7 Model logic tree sumber gempa background

### 3.3.7 Analisis Bahaya Gempa

Berdasarkan (Cornell, 1968), analisis bahaya gempa dilakukan dengan menggunakan teori probabilitas total. Model dan konsep tersebut masih tetap digunakan hingga sekarang, dengan analisis dan teknik perhitungan yang terus dikembangkan seperti dilakukan oleh (McGuire, 1976). Hasil akhir dari analisis bahaya gempa pada penelitian ini adalah percepatan gempa maksimum di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2.475 tahun) dan kurva bahaya gempa (*seismic hazard curve*).

### 3.3.8 Peta Percepatan Tanah di Batuan Dasar

Hasil akhir dari analisis bahaya gempa menggunakan pendekatan probabilitas diekspresikan dalam bentuk parameter-parameter probabilitas terlampaui percepatan gerakan tanah di batuan dasar ( $a \geq a^*$ ) untuk suatu periode desain ( $P_{(t \text{ tahun})} = 1 - e^{\lambda(a).t}$ ), kejadian gempa tahunan ( $\lambda_{(a)}$ ), dan periode ulang desain ( $T_R$ ). Setelah itu, hasil percepatan tanah di batuan dasar ditampilkan dalam bentuk peta interpolasi dengan menggunakan *software ArcGIS*. Hasil yang diperoleh merupakan peta

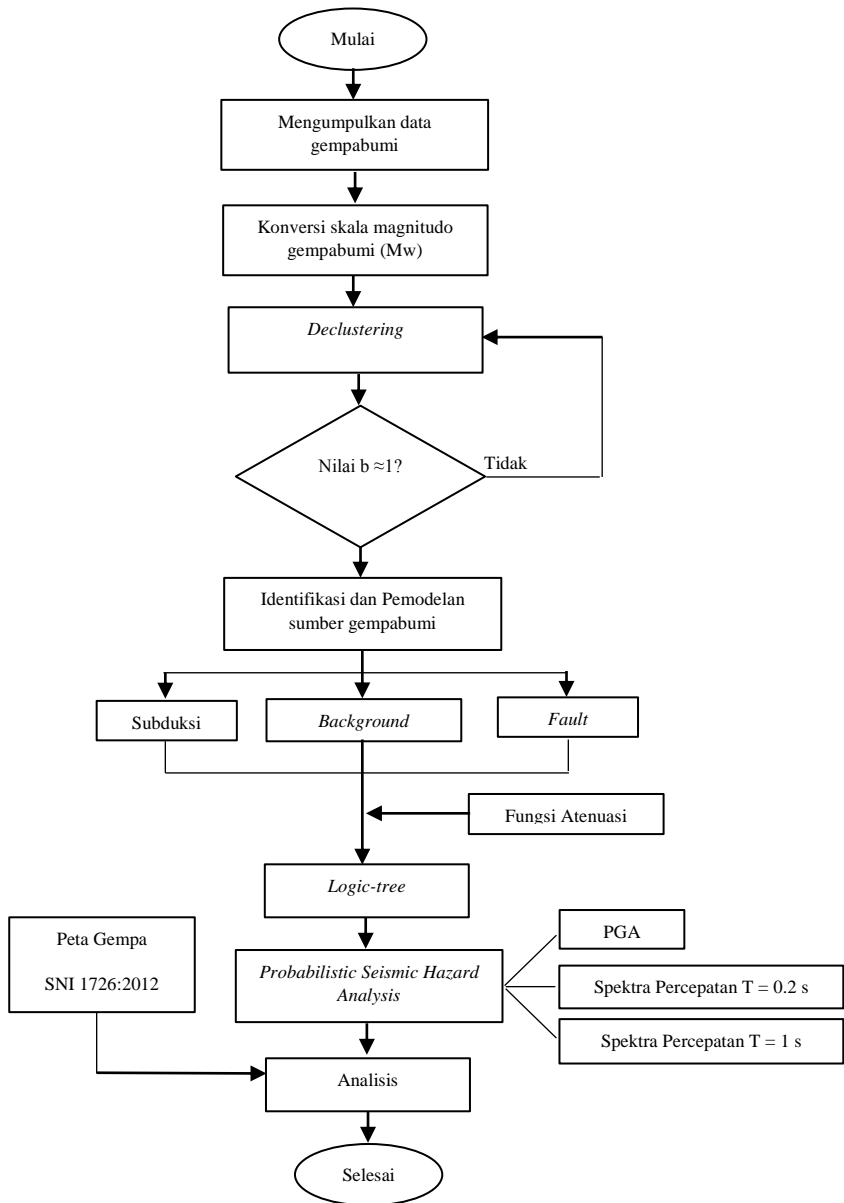
percepatan tanah di batuan dasar yang menunjukkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan respon spektra percepatan pada periode pendek ( $T = 0,2$  detik) dan periode panjang ( $T = 1$  detik). Hasil yang diperoleh akan diverifikasi dengan penelitian yang telah tercantum dalam peta (SNI, 2012).

### 3.3.9 Kurva Bahaya Gempa (*Seismic Hazard Curve*)

Pada penelitian ini, selain parameter percepatan gerakan tanah, juga diperoleh respon spektra untuk probabilitas terlampaui percepatan gerakan tanah di batuan dasar ( $a \geq a^*$ ) untuk suatu periode desain ( $P_{(t \text{ tahun})} = 1 - e^{-\lambda(a).t}$ ) yang disajikan dalam bentuk kurva *hazard*. Kurva *hazard* ini menunjukkan hubungan antara laju kejadian per tahun (*annual rate of exceedance*) terhadap besar percepatan gerakan tanah akibat gempa yang terjadi (*peak ground acceleration*). Dari kurva tersebut kita dapat mengetahui kontribusi untuk masing-masing sumber gempa yang digunakan. Selain itu, dapat diketahui kontribusi sumber gempa yang paling dominan terhadap suatu lokasi yang ditinjau.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian yang sudah diuraikan di atas, dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Flowchart penelitian

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Analisis Probabilistic Seismic Hazard**

Pada penelitian ini, data gempa yang digunakan merupakan gabungan dari katalog lembaga yang melakukan pengamatan kegempaan baik nasional maupun internasional yaitu Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan katalog *United States Geological Survey* (USGS) yang terdiri dari NEIC, NOAA, PDQ, dan gabungan katalog ANSS (*The Advanced National Seismic System*). Data katalog BMKG yang digunakan memiliki batas koordinat  $3,6^{\circ}$  –  $12,65^{\circ}$  LS dan  $108,2^{\circ}$  –  $117,2^{\circ}$  BT sedangkan data katalog USGS memiliki pusat koordinat  $-8,152^{\circ}$  LS dan  $112,691^{\circ}$  BT dengan radius 500 km dengan batas kedalaman maksimum hingga 300 km. Data gempa diambil dari tahun 1900 hingga tahun 2017.

Hasil penelitian berupa nilai percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan respon spektra percepatan pada periode pendek ( $T = 0,2$  detik) dan periode panjang ( $T = 1$  detik) di batuan dasar. Analisis bahaya (*hazard*) gempa dengan pendekatan probabilistik dibatasi untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 2.475 tahun, di mana peraturan-peraturan gempa modern saat ini telah menggunakan ketentuan tersebut (Sunardi, 2013). Analisis pada penelitian ini difokuskan pada enam titik, yaitu Kota Malang, Kecamatan Kepanjen, Kecamatan Sumbermanjing, Kota Batu, Kecamatan Bumiaji, dan Kecamatan Singosari. Satuan yang digunakan pada PGA dan spektra percepatan adalah satuan “g” (gravitasi).

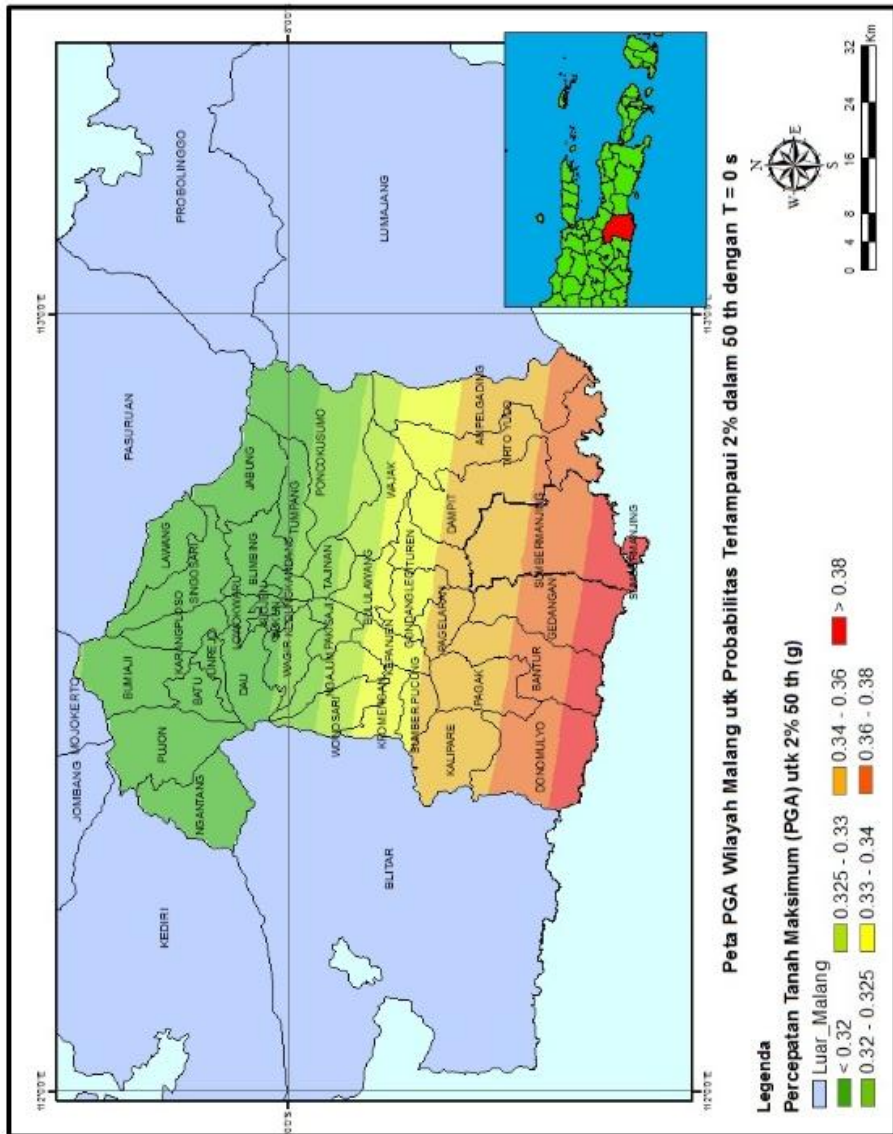
#### **4.2 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar (PGA)**

Pada penelitian ini, digunakan tiga jenis sumber gempa, yaitu sumber gempa subduksi/*megathrust*, sumber gempa patahan/*fault*, dan sumber gempa *background*. Untuk sumber gempa *background* dibedakan dalam 2 jenis sumber gempa yaitu

*shallow background* dan *deep background*. Tiap-tiap jenis sumber gempa ini memberikan kontribusi dalam perhitungan *peak ground acceleration* (PGA) di batuan dasar. *Peak ground acceleration* merepresentasikan tingkat besarnya percepatan tanah di batuan dasar. Nilai PGA di batuan dasar diperoleh melalui kombinasi dari nilai-nilai percepatan tanah maksimum dari tiap-tiap model sumber gempa untuk periode ulang 2.475 tahun.

Hasil analisis menunjukkan nilai PGA di batuan dasar untuk wilayah Malang memiliki nilai antara 0.311 g hingga 0.433 g yang disajikan dalam peta PGA di batuan dasar untuk periode  $T=0$  detik seperti pada gambar 4.1. Gambar 4.1 menunjukkan pada Kecamatan Donomulyo, Kecamatan Bantur, Kecamatan Gedangan dan Kecamatan Sumbermanjing, yang berada di pesisir pantai, memiliki nilai PGA yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lain. Nilai PGA yang tinggi ini disebabkan karena lokasi tersebut paling dekat dengan sumber gempa subduksi (*megathrust*). Sehingga dari gambar 4.1 didapatkan pola semakin ke selatan semakin tinggi nilai PGA yang diperoleh pada perhitungan.

Selain itu, di wilayah utara juga terjadi kenaikan nilai PGA. Kenaikan rentang nilai PGA di wilayah utara dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Kendeng yang berjarak sekitar 90 km dari wilayah penelitian. Namun pola pada peta PGA tidak terlalu terlihat adanya kenaikan nilai PGA di wilayah utara. Hal ini disebabkan karena letak Sesar Kendeng yang jauh dari wilayah Malang. Apabila gempa semakin jauh, maka periode yang dihasilkan semakin panjang. Periode yang panjang ini akan terlihat pada peta dengan periode yang panjang pula. Hal ini dibuktikan bahwa pada peta spektra percepatan  $T=0.2$  detik (pada gambar 4.2) dan  $T=1$  detik (pada gambar 4.3) pola kenaikan rentang percepatan di wilayah Malang bagian utara terlihat dengan jelas.



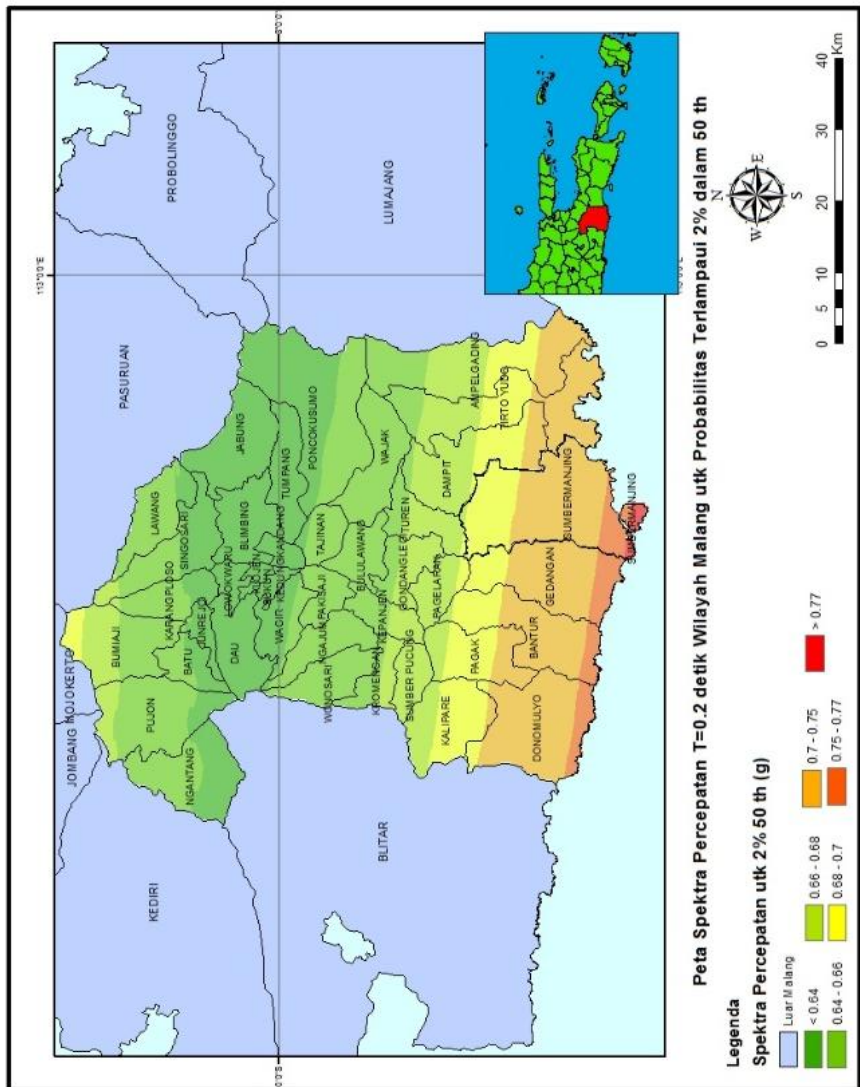
Gambar 4.1 Peta nilai percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dengan  $T = 0$  detik

### 4.3 Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra $T = 0.2$ detik (Ss)

Pada penelitian ini juga didapatkan peta spektra percepatan untuk periode pendek ( $T=0.2$  detik). Sebagaimana untuk mendapatkan nilai PGA, perhitungan juga dilakukan dengan melibatkan tiga jenis sumber gempa, yaitu sumber gempa subduksi/*megathrust*, sumber gempa patahan/*fault*, dan sumber gempa *background*. Dari hasil perhitungan akan didapatkan nilai percepatan tanah pada kondisi spektra percepatan  $T=0.2$  detik.

Peta percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 0.2$  detik menunjukkan nilai rentang percepatan tanah berkisar antara 0.629 g hingga 0.884 g. Nilai percepatan tanah di batuan dasar disajikan pada gambar 4.2. Dari gambar 4.2 terlihat pola yang sama dengan peta nilai percepatan tanah maksimum di batuan dasar (PGA). Di wilayah Malang bagian selatan memiliki rentang nilai antara 0.68 – 0.88 g. Hal ini disebabkan karena daerah tersebut dekat dengan sumber gempa subduksi (*megathrust*). Selain itu, di wilayah utara juga terjadi kenaikan nilai dengan rentang nilai antara 0.64 – 0.70 g. Untuk daerah Malang bagian utara kenaikan disebabkan oleh adanya pengaruh sumber gempa *fault*, di mana yang berperan besar dan terletak paling dekat dengan wilayah Malang adalah Sesar Kendeng. Pada kondisi spektra  $T = 0.2$  detik nilai percepatan tanah yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan nilai PGA. Pola kenaikan percepatan tanah di wilayah utara juga lebih terlihat. Daerah-daerah yang memiliki nilai spektral percepatan yang tinggi tersebut memiliki bahaya gempa yang relatif lebih besar.



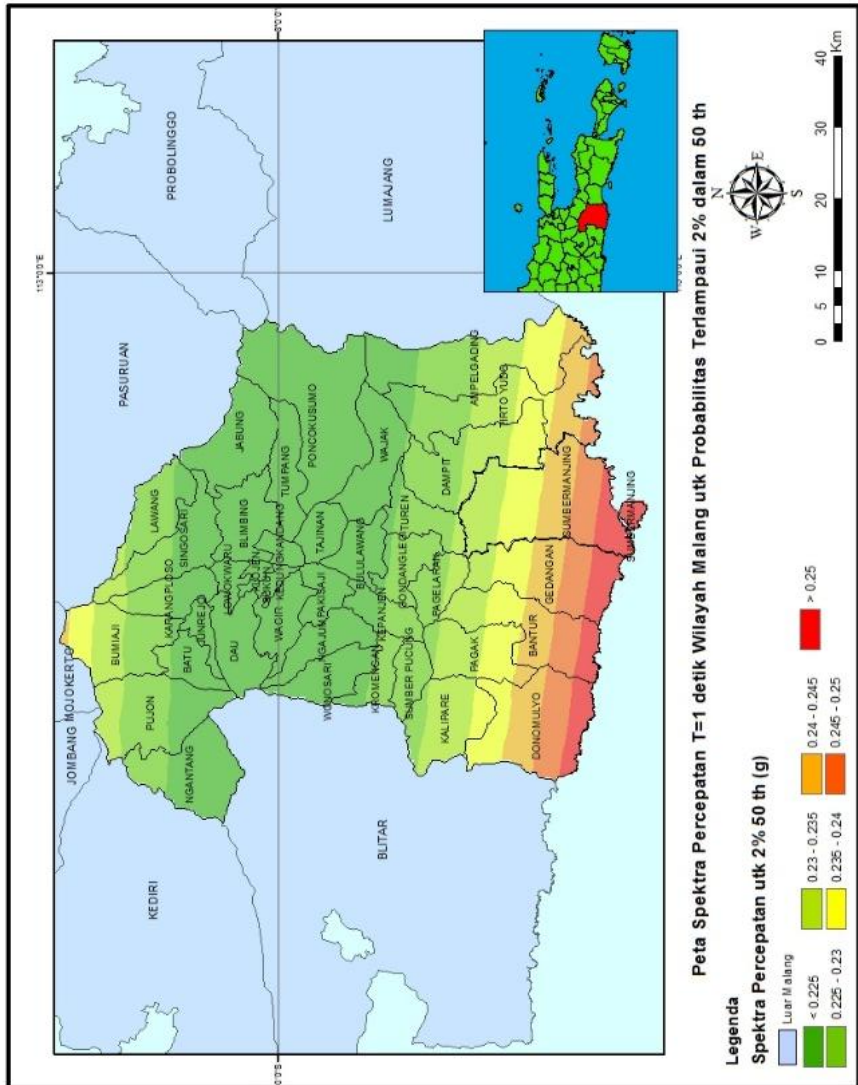


Gambar 4.2 Peta nilai percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra T = 0.2 detik untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun

#### **4.4 Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra $T = 1$ detik ( $S_1$ )**

Selanjutnya akan dilakukan analisis percepatan tanah di batuan dasar untuk kondisi spektra  $T=1$  detik. Didapatkan peta percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 1$  detik menunjukkan nilai rentang percepatan tanah berkisar antara 0.220 g hingga 0.286 g sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.3. Pada gambar 4.3 terlihat kenaikan nilai percepatan di wilayah Malang bagian utara dan wilayah Malang bagian selatan. Di wilayah Malang bagian selatan memiliki rentang nilai antara 0.23 – 0.28 g. Hal ini disebabkan karena daerah tersebut dekat dengan sumber gempa subduksi (*megathrust*). Sedangkan kenaikan nilai percepatan di wilayah utara memiliki rentang nilai antara 0.23 – 0.24 g. Untuk daerah Malang bagian utara kenaikan disebabkan oleh adanya pengaruh sumber gempa *fault*, di mana yang berperan besar dan terletak paling dekat dengan wilayah Malang adalah Sesar Kendeng. Pada kondisi spektra  $T = 1$  detik nilai percepatan tanah yang diperoleh tidak lebih tinggi dibandingkan nilai PGA dan kondisi spektra  $T = 0.2$  detik.

Pada gambar 4.3 dan 4.2, kenaikan nilai percepatan wilayah Malang bagian utara lebih terlihat daripada pada gambar 4.1. Hal ini disebabkan karena letak Sesar Kendeng yang berada 90 km dari wilayah Malang. Apabila sumber gempa semakin jauh, periode yang dihasilkan akan semakin panjang juga. Periode yang panjang ini akan mempengaruhi bangunan-bangunan dengan periode yang lebih panjang juga, yaitu bangunan-bangunan yang lebih tinggi. Periode panjang ( $T=1$  detik) mempengaruhi bangunan yang lebih tinggi dibandingkan dengan periode pendek ( $T=0.2$  detik) dan  $T=0$  detik.



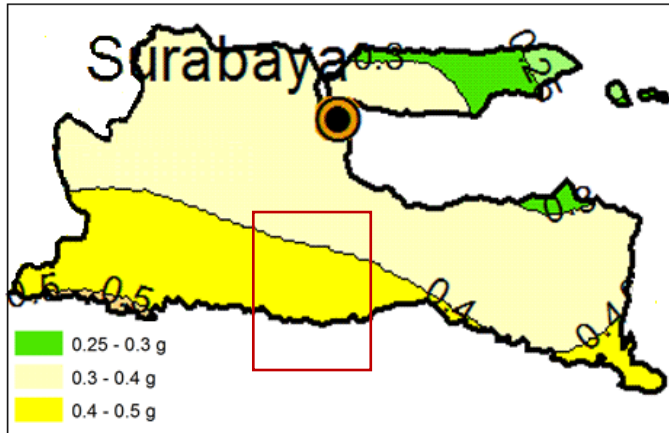
Gambar 4.3 Peta nilai percepatan tanah di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 1$  detik untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun

#### 4.5 Perbandingan dengan SNI 1726:2012

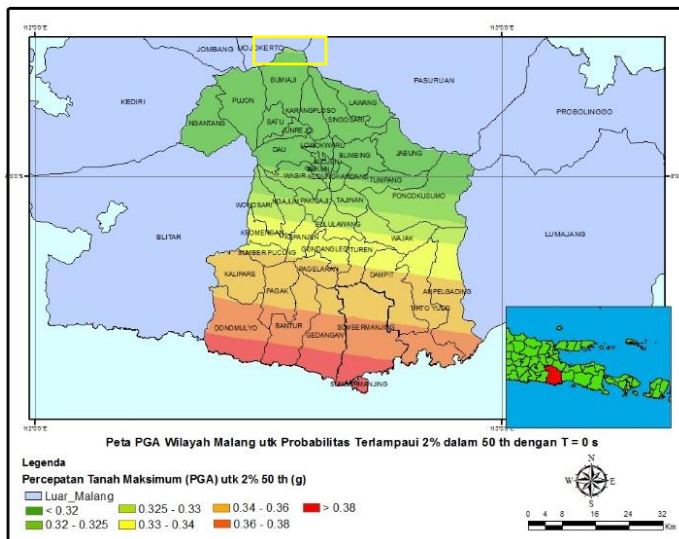
Hasil dari penelitian ini akan dibandingkan dengan peta *hazard* SNI 1726:2012 sebagaimana diperlihatkan pada gambar 4.4. Wilayah yang berada dalam kotak merah adalah wilayah penelitian. Hasil dari penelitian ini akan dibandingkan dengan SNI 1726:2012. Hasil perhitungan pada penelitian ini jika dibandingkan dengan SNI 1726:2012, terlihat bahwa ada sedikit perbedaan rentang nilai percepatan di batuan dasar. Dari hasil penelitian, terlihat bahwa wilayah Malang bagian selatan memiliki nilai percepatan yang tinggi dibandingkan dengan wilayah Malang bagian utara. Hal ini sesuai dengan pola yang terlihat pada SNI 1726:2012.

Kelebihan pada penelitian ini adalah telah memperhitungkan keberadaan Sesar Kendeng sementara dalam SNI 1726:2012 belum memperhitungkan keberadaan sesar tersebut. Oleh karena itu terdapat adanya perbedaan hasil di bagian utara wilayah Malang seperti yang terlihat pada kotak kuning pada gambar 4.4 (b). Perbedaan ini disebabkan karena penggunaan model sumber gempa *fault*, yaitu keberadaan Sesar Kendeng, sehingga dihasilkan pola wilayah Malang bagian utara memiliki nilai percepatan yang meninggi. Selain itu, keberadaan sesar-sesar lokal di Jawa Timur yang dapat mempengaruhi nilai percepatan di wilayah Malang dilakukan dengan penggunaan model *background*.

Gambar 4.4 (a) menunjukkan peta percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dengan periode ulang gempa 2475 tahun yang tercantum dalam (SNI, 2012).



a



b

Gambar 4.4 (a) Peta percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun pada (SNI, 2012), (b) Peta percepatan tanah maksimum (PGA) di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun hasil penelitian

Selain terdapat perbedaan pola, terdapat perbedaan rentang nilai PGA dari hasil penelitian ini dengan hasil dalam SNI 1726:2012. Hal ini dikarenakan perbedaan fungsi atenuasi yang digunakan pada penelitian ini dengan SNI 1726:2012. Fungsi atenuasi merupakan persamaan matematika sederhana yang menghubungkan antara parameter kegempaan di lokasi pusat gempa, meliputi magnitudo ( $M$ ) dan jarak ( $R$ ), dengan parameter pergerakan tanah (spektra percepatan) di lokasi yang ditinjau (Campbell and Bozorgnia, 2008). Fungsi atenuasi cenderung spesifik untuk setiap wilayah dan suatu tipe sumber gempa, misalnya fungsi atenuasi untuk *strike-slip* berbeda dengan untuk *reverse* atau *thrust fault* (Sunardi, 2013). Begitupun juga fungsi atenuasi untuk *fault* berbeda dengan fungsi atenuasi untuk *megathrust*.

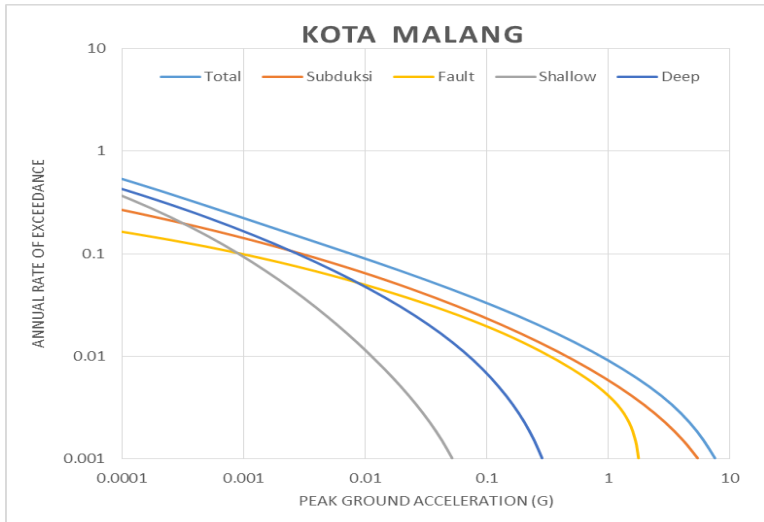
#### **4.6 Kurva Bahaya Gempa (*Seismic Hazard Curve*)**

Pada penelitian ini didapatkan kurva bahaya gempa untuk beberapa daerah penelitian. Daerah penelitian tersebut meliputi Kota Malang, Kecamatan Kepanjen, Kecamatan Sumbermanjing, Kota Batu, Kecamatan Bumiaji, dan Kecamatan Singosari. Kurva *hazard* ini menggambarkan laju terlampauinya parameter terhadap intensitas. Kontribusi dari setiap sumber gempa yang digunakan dapat dijumlahkan satu dengan yang lainnya sebagai hasil akhir untuk mendapatkan kurva bahaya dari parameter yang dipilih. Kurva bahaya gempa pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui kontribusi dari masing-masing sumber gempa yang dominan terjadi.

##### **4.6.1 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kota Malang**

Kurva bahaya gempa di daerah Kota Malang menunjukkan laju kejadian per tahun (*Annual Rate of Exceedance*) tertinggi adalah sumber gempa *Deep Background* dan sumber gempa yang mempunyai nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa subduksi. Selain sumber gempa subduksi, sumber gempa *fault* juga memiliki nilai *hazard* yang tinggi.

Kurva bahaya gempa yang dihasilkan untuk Kota Malang ditunjukkan seperti pada gambar 4.5.



a

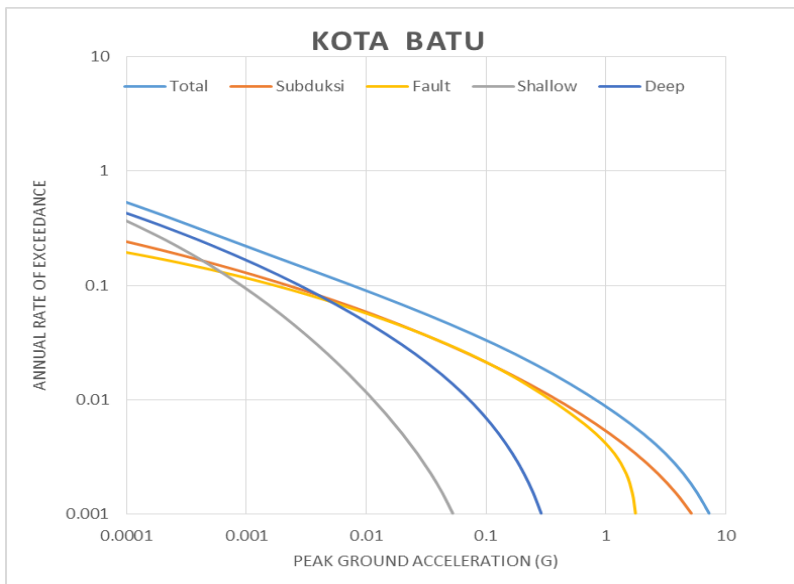


b

Gambar 4.5 (a) Kurva *hazard* gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kota Malang. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kota Malang (warna merah)

#### 4.6.2 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kota Batu

Gambar 4.6 menunjukkan kurva bahaya gempa yang dihasilkan untuk Kota Batu. Sama seperti halnya pada kurva bahaya gempa di Kota Malang, kurva bahaya gempa di daerah Kota Batu menunjukkan laju kejadian per tahun (*Annual Rate of Exceedance*) tertinggi adalah sumber gempa *Deep Background* dan sumber gempa yang mempunyai nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa subduksi. Selain sumber gempa subduksi, sumber gempa *fault* juga memiliki nilai *hazard* yang tinggi.





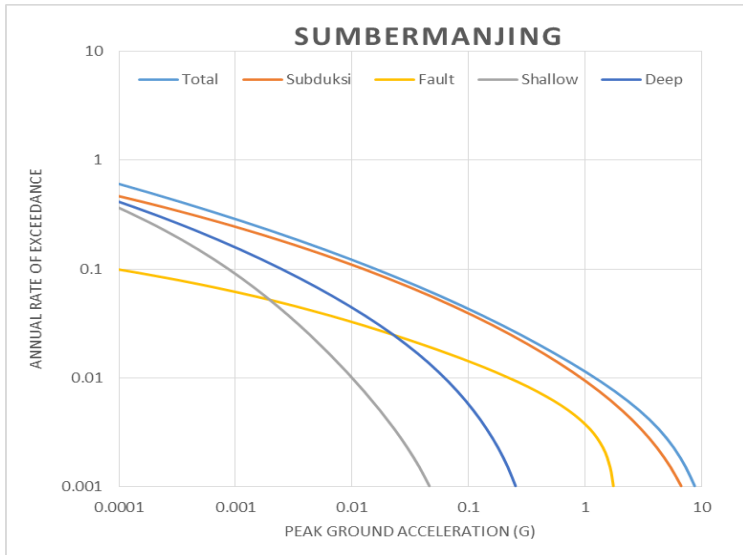


b

Gambar 4.6 (a) Kurva *hazard* gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kota Batu. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kota Batu (warna merah)

#### 4.6.3 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Sumbermanjing

Gambar 4.7 menunjukkan kurva bahaya gempa yang dihasilkan untuk Kecamatan Sumbermanjing. Pada Kecamatan Sumbermanjing ini, kurva *hazard* gempa menunjukkan laju kejadian per tahun (*Annual Rate of Exceedance*) tertinggi dan nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa subduksi. Daerah ini merupakan daerah yang berada di Malang bagian selatan, di mana sumber gempa yang mendominasi daerah ini berasal dari sumber gempa subduksi (*megathrust*) yang berada di wilayah selatan Malang.



a

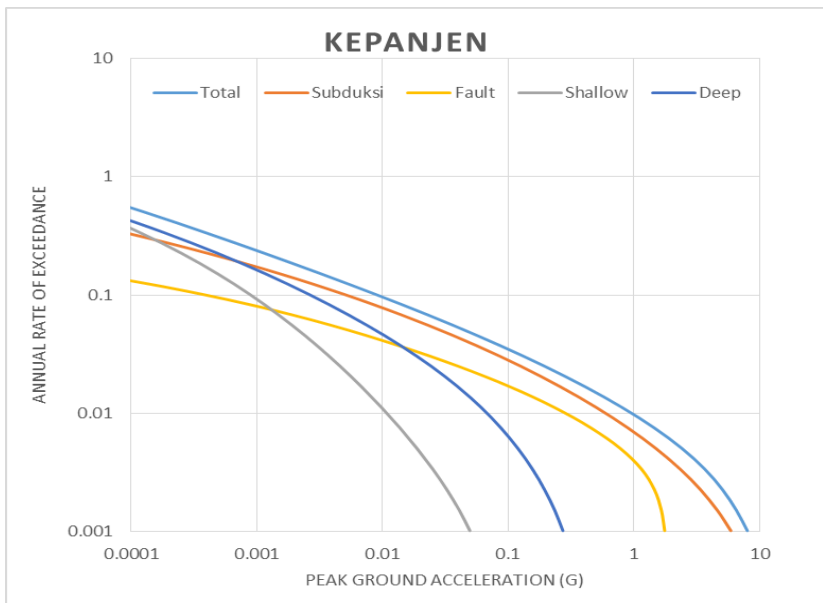


b

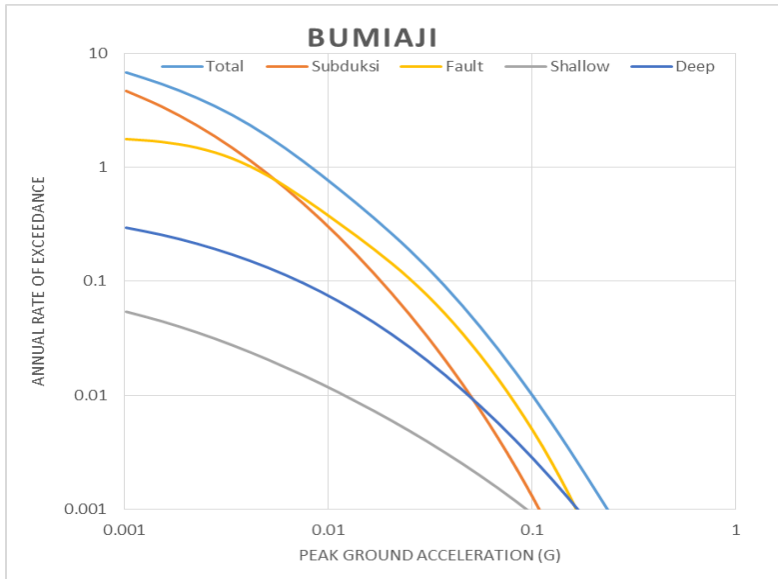
Gambar 4.7 (a) Kurva *hazard* gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Sumbermanjing. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Sumbermanjing (warna merah)

#### 4.6.4 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Kepanjen

Kurva bahaya gempa untuk Kecamatan Kepanjen ditunjukkan sebagaimana gambar 4.8. Pada Kecamatan Kepanjen ini, laju kejadian per tahun (*Annual Rate of Exceedance*) tertinggi adalah sumber gempa *Deep Background* dan sumber gempa yang mempunyai nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa subduksi. Daerah ini merupakan daerah yang berada di Malang bagian selatan, di mana sumber gempa yang mendominasi daerah ini berasal dari sumber gempa subduksi (*megathrust*) yang berada di wilayah selatan Malang. Selain sumber gempa subduksi, sumber gempa *fault* juga memiliki nilai *hazard* yang tinggi.







a

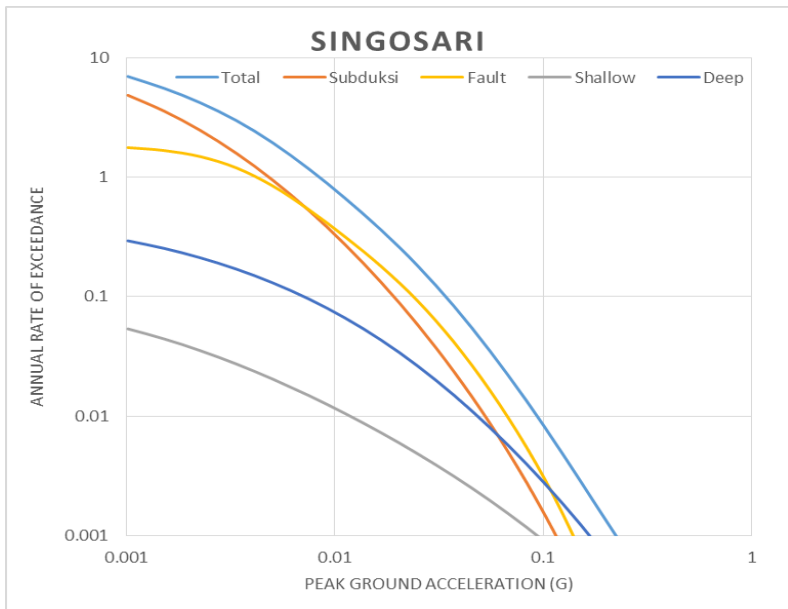


b

Gambar 4.9 (a) Kurva *hazard* gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Bumiaji. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Bumiaji (warna merah)

#### 4.6.6 Kurva Bahaya Gempa untuk Daerah Kecamatan Singosari

Kurva bahaya gempa yang dihasilkan pada Kecamatan Singosari ditunjukkan pada gambar 4.10. Kurva bahaya gempa di daerah Kecamatan Singosari menunjukkan laju kejadian per tahun (*Annual Rate of Exceedance*) tertinggi adalah sumber gempa subduksi dan sumber gempa yang mempunyai nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa *deep background*. Apabila dibandingkan sumber gempa subduksi dan *fault*, di wilayah ini lebih dominan nilai *hazard* sumber gempa *fault* daripada sumber gempa subduksi.





b

Gambar 4.10 (a) Kurva *hazard* gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Kecamatan Singosari. (b) Peta wilayah Malang dan lokasi daerah Kecamatan Singosari (warna merah)

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang dengan Menggunakan Pendekatan Probabilistik dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai percepatan tanah (PGA) dan spektra percepatan di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) untuk wilayah Malang diperoleh rentang nilai percepatan 0.31 – 0.43 g untuk PGA, 0.62 – 0.88 g untuk periode pendek ( $T = 0.2$  detik), dan 0.22 – 0.28 g untuk periode panjang ( $T = 1$  detik)
2. Wilayah Malang bagian selatan dominan dipengaruhi oleh sumber gempa subduksi/*megathrust* sedangkan untuk wilayah Malang bagian utara terdapat pengaruh dari sumber gempa *fault*
3. Sumber gempa *fault* memberi pengaruh *hazard* untuk wilayah Malang bagian utara, di mana nilai *hazard* ini akibat keberadaan Sesar Kendeng

#### **5.2 Saran**

Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai analisis bahaya kegempaan di wilayah Malang dengan menggunakan sesar-sesar lokal yang ada di wilayah Jawa Timur dan menggunakan fungsi atenuasi yang berbeda. Selain itu diharapkan penelitian ini dapat melengkapi peta tata wilayah area penelitian sebagai upaya mitigasi gempabumi.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., 2005. Probability and uncertainty in seismic hazard analysis. *Earthq. Spectra* 21, 603–607.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., 1997. Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismol. Res. Lett.* 68, 94–127.
- BMKG, 2009. Sejarah Gempa Merusak.
- Bolt, B.A., 1978. *Earthquakes: A Primer*. W. H. Freeman.
- Bommer, J.J., 2005. On the Use of Logic Trees for Ground-Motion Prediction Equations in Seismic-Hazard Analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 377–389. doi:10.1785/0120040073
- BPS Kota Malang, 2016. *Malang Dalam Angka 2016*. BPS, Malang.
- BPS Kota Malang, 2011. *Malang Dalam Angka 2011*. BPS, Malang.
- Campbell, K.W., 2003. Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93, 1012–1033.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., 2008. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthq. Spectra* 24, 139–171. doi:10.1193/1.2857546
- Convertito, V., Emolo, A., Zollo, A., 2006. Seismic-hazard assessment for a characteristic earthquake scenario: an integrated probabilistic–deterministic method. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, 377–391.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1583–1606.

- Crouse, C.B., 1992. Seismic Hazard Evaluation Offshore Northwest Java, Indonesia. Rep. MaxusARII Offshore Area Indones.
- EERI, C. on S.R., 1989. The Basic of Seismic Risk Analysis (No. 5 (4)). Earthquake Spectra.
- Farhadi, A., Mousavi, M., 2016. Consideration of the rupture model uncertainties in the probabilistic seismic hazard analysis. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 83, 191–204. doi:10.1016/j.soildyn.2016.01.014
- Fauzi, U.J., 2011. Peta Deagregasi Indonesia Berdasarkan Analisis Probabilitas dengan Sumber Gempa Tiga Dimensi. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Garcia, D., 2005. Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 2272–2282. doi:10.1785/0120050072
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944. Frequency of Earthquakes In California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 34, 185–188.
- Hutapea, B.M., Mangape, I., 2009. Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion pada Batuan Dasar untuk Kota Jakarta. *J. Tek. Sipil* 16, 121–132.
- Imran, I., Boediono, B., 2010. Mengapa Gedung-gedung Kita Runtuh Saat Gempa.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., 2010. Ringkasan Hasil Sudi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010. Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, Bandung.
- Katili, J.A., 1980. Geotectonic of Indonesia: a Modernview. Department of Geology, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Kompas.com, 2016a. 29 Rumah di Malang Rusak akibat Gempa. Kompas.com.
- Kompas.com, 2016b. Sesar Kendeng Terbukti Aktif, Jawa Timur Perlu Lebih Waspada Gempa. Kompas.com.

- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J., Syafi'i, M.A., 2016. Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc: Crustal strain in the Sunda-Banda Arc. *Geophys. Res. Lett.* 43, 1943–1949. doi:10.1002/2016GL067941
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.
- Kulkarni, R.B., Youngs, R.R., Coppersmith, K.J., 1984. Assessment of Confidence Intervals for Result of Seismic Hazard Analysis, in: *Proceedings of the Eight World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, pp. 263–270.
- Kumala, S.A., Wahyudi, 2016. ANALISIS NILAI PGA (PEAK GROUND ACCELERATION) UNTUK SELURUH WILAYAH KABUPATEN DAN KOTA DI JAWA TIMUR. *INERSIA* 12, 37–43.
- Mahesworo, R.P., 2008. *Usulan Ground Motion Untuk Empat Kota Besar Di Wilayah Sumatera Berdasarkan Hasil Analisis Seismic Hazard Menggunakan Model Sumber Gempa 3 Dimensi*. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Makrup, L.L., Irsyam, M., Sengara, I.W., Hendriyawan, 2009. Hazard Deaggregation for Indonesia. *J. Tek. Sipil* 17, 181–190.
- Malang Times, 2016. 399 Gempa Bumi Landa Jawa Timur Selama 2016. *Malang Times*.
- McGuire, R.K., 2004. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. EERI Monogr. MNO-10 Earthq. Eng. Res. Inst. Oakl. Calif. 187.
- McGuire, R.K., 2001. Deterministic Vs. Probabilistic Earthquake Hazards and Risk. *Risk Eng. Inc Publ. Pap.* 21, 377–384.
- McGuire, R.K., 1976. *FORTTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*. USGS Geol. Surv. 76–67.
- Natawidjaja, D.H., 2007. *Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup*

- yang Aman Dari Bencana Alam, in: Symposium. ITB: Bandung.
- Newcomb, K.R., McCann, W.R., 1987. Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 92, 421–439. doi:10.1029/JB092iB01p00421
- Nugraha, J., 2014. ANALISIS HAZARD GEMPA DAN ISOSEISMAL UNTUK WILAYAH JAWA-BALI-NTB. *J. Meteorol. Dan Geofis.* 15.
- Pacheco, J.F., Sykes, L.R., 1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82, 1306–1349.
- Petersen, M.D., Dewey, J., Hartzell, S., Mueller, C., Harmsen, S., Frankel, A., Rukstales, K., 2004. Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula. *Tectonophysics* 390, 141–158. doi:10.1016/j.tecto.2004.03.026
- Prawirodikromo, W., 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar.
- Reid, H.F., 1911. The elastic-rebound theory of Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2, 98–100.
- SEAOC, V. 2000 C., 1997. *Performance Based Seismic Engineering*. Association of California, California.
- SNI, 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (SNI 1726:2012)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Spudich, P., Fletcher, J.B., Hellweg, M., Boatwright, J., Sullivan, C., Joyner, W.B., Hanks, T.C., Boore, D.M., McGarr, A., Baker, L.M., others, 1996. Earthquake ground motions in extensional tectonic regimes. *US Geol. Surv. Open-File Rep.* 96, 292–351.
- Spudich, P., J.B. Fletcher, M. Hellweg, J. Boatwright, C. Sullivan, W. B. Joyner, T. C. Hanks, 1997. SEA96-A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes. *Seismol. Res. Lett.* 68.

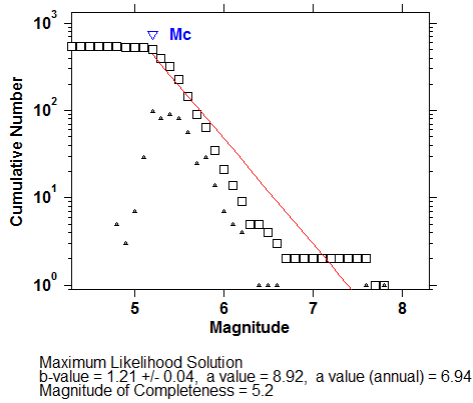
- Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B. u, Fletcher, J.B., 1999. SEA99: a revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 89, 1156–1170.
- Sunardi, B., 2013. Peta Deagregasi Hazard Gempa Wilayah Jawa dan Rekomendasi Ground Motion di Empat Daerah. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Susilo, A., Adnan, Z., 2013. Probabilistic Seismic Hazard Analysis of East Java Region, Indonesia. *Int. J. Comput. Electr. Eng.* 341–344. doi:10.7763/IJCEE.2013.V5.728
- Youngs, R.R., S. J. Chiou, W. J. Silva, J.R. Humphrey, 1997. Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 68.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

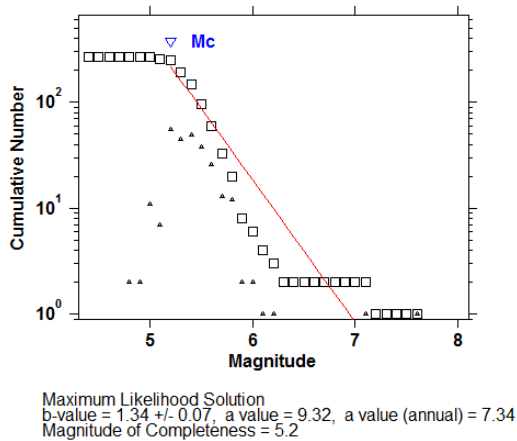


## LAMPIRAN

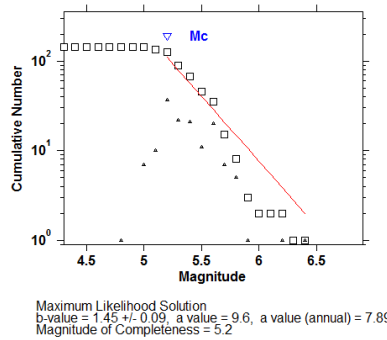
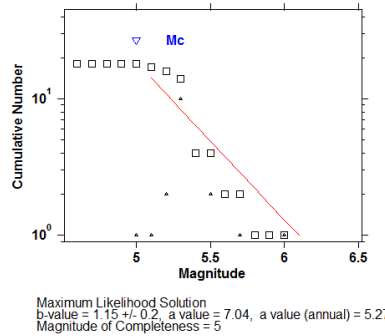
- LAMPIRAN A  
a-b value



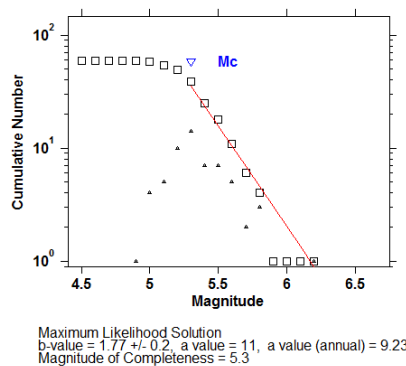
Gambar 1. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *megathrust* Jatim



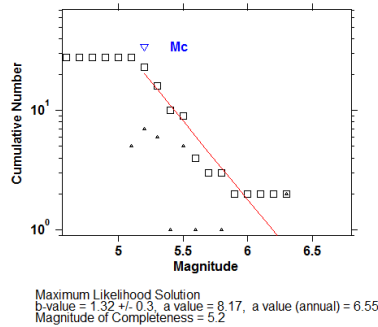
Gambar 2. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *megathrust* Jateng

Gambar 3. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *megathrust* Sumba

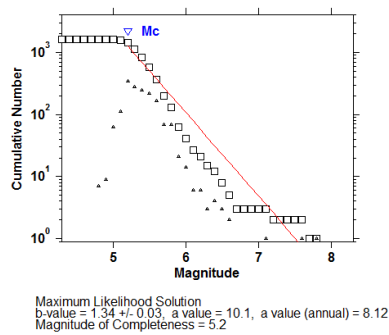
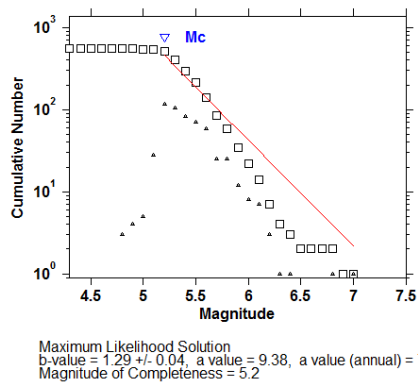
Gambar 4. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo Sesar Kendeng

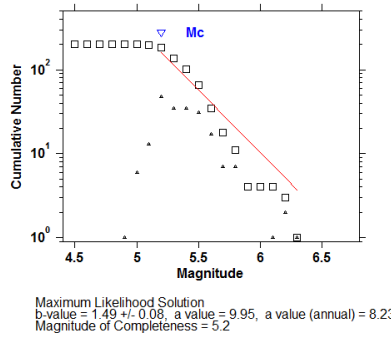
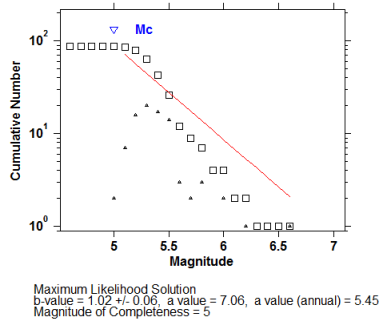
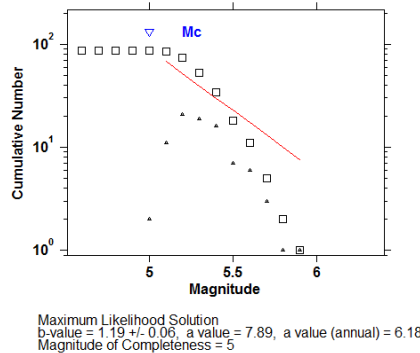


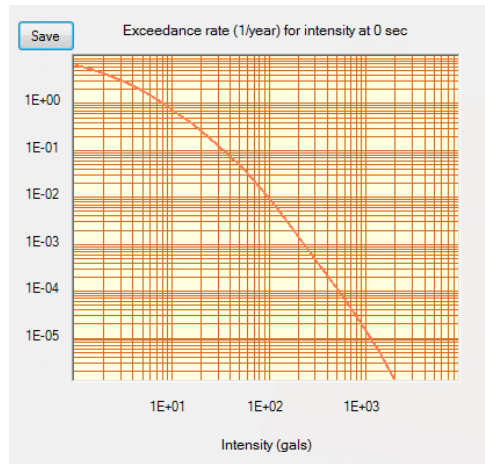
Gambar 5. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo Sesar Back Arc 1



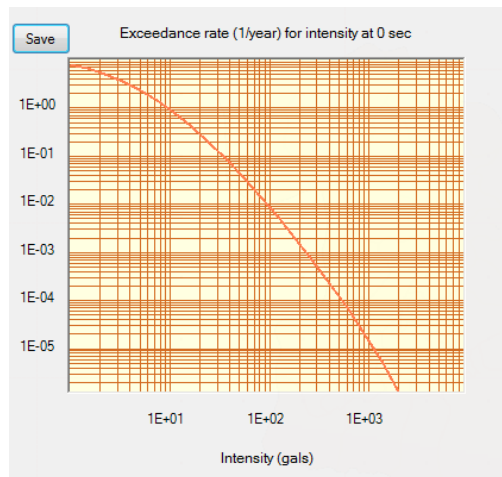
Gambar 6. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo Sesar Opak

Gambar 7. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *Background Shallow*Gambar 8. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *Background Deep 1*

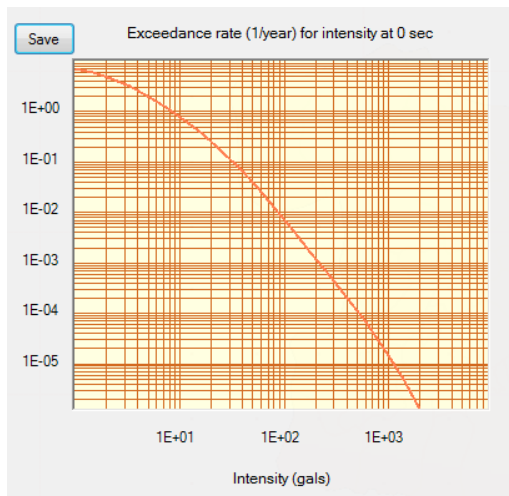
Gambar 9. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *Background Deep 2*Gambar 10. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *Background Deep 3*Gambar 11. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo *Background Deep 4*



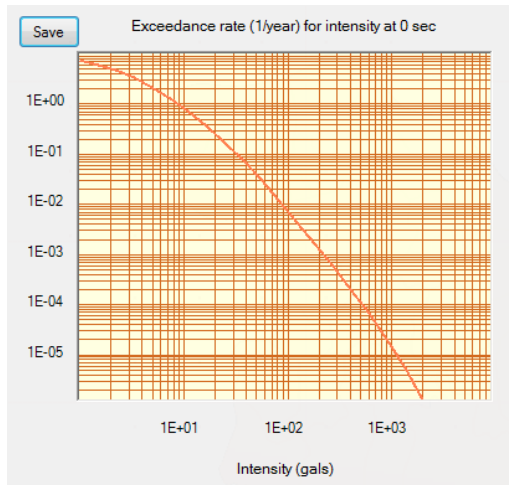
Gambar 12. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Bumiaji



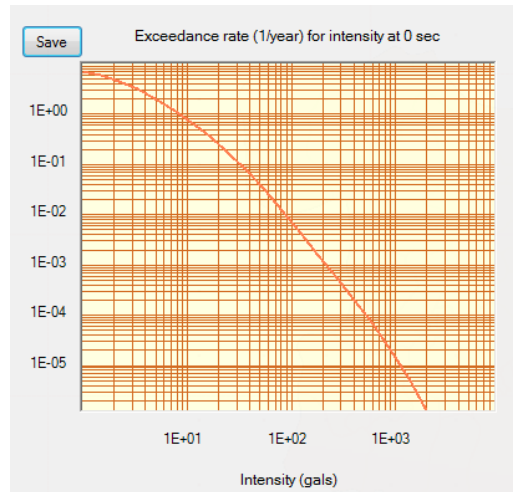
Gambar 13. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Kepanjen



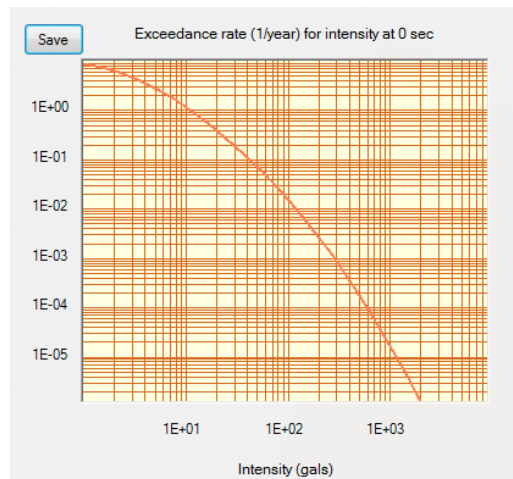
Gambar 14. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Kota Batu



Gambar 15. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Kota Malang



Gambar 16. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Singosari



Gambar 17. Kurva *exceedance rate* terhadap intensitas pada 0 detik di wilayah Sumbermanjing

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



- LAMPIRAN B

Tabel 1. Nilai Percepatan Tanah Maksimum (PGA) di Batuan Dasar pada wilayah Malang

lon	lat	PGA (gal)	PGA (g)
112.333	-8.489	425.0318	0.433264
112.433	-8.489	419.5272	0.427653
112.533	-8.489	414.3657	0.422391
112.633	-8.489	409.1557	0.41708
112.733	-8.489	403.3615	0.411174
112.833	-8.489	398.7994	0.406523
112.933	-8.489	393.5776	0.4012
112.233	-8.389	395.1948	0.402849
112.333	-8.389	390.0577	0.397612
112.433	-8.389	385.4942	0.39296
112.533	-8.389	380.8304	0.388206
112.633	-8.389	376.1616	0.383447
112.733	-8.389	372.1594	0.379367
112.833	-8.389	368.1915	0.375323
112.933	-8.389	364.3012	0.371357
113.033	-8.389	360.8914	0.367881
112.233	-8.289	366.1039	0.373195
112.333	-8.289	361.4558	0.368456
112.433	-8.289	357.4671	0.36439
112.533	-8.289	354.4147	0.361279
112.633	-8.289	351.4836	0.358291
112.733	-8.289	348.6698	0.355423
112.833	-8.289	346.0809	0.352784
112.933	-8.289	343.4681	0.35012

113.033	-8.289	340.9482	0.347552
112.233	-8.189	343.5666	0.350221
112.333	-8.189	340.9529	0.347556
112.433	-8.189	338.516	0.345072
112.533	-8.189	336.2129	0.342725
112.633	-8.189	334.0398	0.340509
112.733	-8.189	331.9714	0.338401
112.833	-8.189	329.9694	0.33636
112.933	-8.189	328.03	0.334383
113.033	-8.189	326.3398	0.33266
113.133	-8.189	324.533	0.330819
112.233	-8.089	328.3565	0.334716
112.333	-8.089	326.4347	0.332757
112.433	-8.089	324.6866	0.330975
112.533	-8.089	323.0322	0.329289
112.633	-8.089	321.4727	0.327699
112.733	-8.089	319.9692	0.326166
112.833	-8.089	318.5722	0.324742
112.933	-8.089	317.2076	0.323351
113.033	-8.089	315.8593	0.321977
113.133	-8.089	314.5873	0.32068
112.133	-7.989	319.0108	0.325189
112.233	-7.989	317.5949	0.323746
112.333	-7.989	316.3362	0.322463
112.433	-7.989	315.1448	0.321248
112.533	-7.989	314.0088	0.320091
112.633	-7.989	312.9568	0.319018
112.733	-7.989	311.9531	0.317995
112.833	-7.989	310.9928	0.317016

112.933	-7.989	310.0839	0.31609
113.033	-7.989	309.2088	0.315198
113.133	-7.989	308.4128	0.314386
112.133	-7.889	311.8729	0.317913
112.233	-7.889	310.9886	0.317012
112.333	-7.889	310.1971	0.316205
112.433	-7.889	309.514	0.315509
112.533	-7.889	308.8812	0.314864
112.633	-7.889	308.2262	0.314196
112.733	-7.889	307.5545	0.313511
112.833	-7.889	306.9279	0.312872
112.933	-7.889	306.314	0.312247
113.033	-7.889	305.8168	0.31174
112.133	-7.789	309.6869	0.315685
112.233	-7.789	309.5443	0.31554
112.333	-7.789	309.3966	0.315389
112.433	-7.789	309.2531	0.315243
112.533	-7.789	309.0674	0.315053
112.633	-7.789	308.7036	0.314683
112.733	-7.789	308.1787	0.314147
112.833	-7.789	307.6921	0.313651
112.133	-7.689	317.6617	0.323814
112.233	-7.689	318.9678	0.325146
112.333	-7.689	320.1234	0.326324
112.433	-7.689	321.1434	0.327363
112.533	-7.689	321.8768	0.328111
112.633	-7.689	321.8268	0.32806
112.433	-7.589	365.9036	0.37299
112.533	-7.589	369.2313	0.376383

Tabel 2. Nilai Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra  $T = 0.2$  detik (Ss) pada wilayah Malang

lon	lat	zgal	zg
112.333	-8.489	814.4874	0.830262
112.433	-8.489	804.4702	0.820051
112.533	-8.489	795.0676	0.810466
112.633	-8.489	785.6566	0.800873
112.733	-8.489	775.3886	0.790406
112.833	-8.489	767.5554	0.782421
112.933	-8.489	758.8866	0.773585
112.233	-8.389	761.5135	0.776263
112.333	-8.389	752.9218	0.767504
112.433	-8.389	745.1996	0.759633
112.533	-8.389	737.3437	0.751625
112.633	-8.389	729.4545	0.743583
112.733	-8.389	722.6213	0.736617
112.833	-8.389	715.8303	0.729694
112.933	-8.389	709.1567	0.722892
113.033	-8.389	703.1847	0.716804
112.233	-8.289	712.1662	0.725959
112.333	-8.289	704.3214	0.717963
112.433	-8.289	697.5307	0.711104
112.533	-8.289	692.1758	0.705582
112.633	-8.289	686.9993	0.700305
112.733	-8.289	682.0252	0.695235
112.833	-8.289	677.4175	0.690538
112.933	-8.289	672.7648	0.685795
113.033	-8.289	668.2881	0.681231
112.233	-8.189	673.4547	0.686498

112.333	-8.189	668.8705	0.681825
112.433	-8.189	664.5602	0.677431
112.533	-8.189	660.4551	0.673247
112.633	-8.189	656.571	0.669287
112.733	-8.189	652.8616	0.665506
112.833	-8.189	649.2679	0.661843
112.933	-8.189	645.8067	0.658315
113.033	-8.189	642.7789	0.655228
113.133	-8.189	639.6191	0.652007
112.233	-8.089	647.5386	0.66008
112.333	-8.089	644.2288	0.656706
112.433	-8.089	641.1881	0.653607
112.533	-8.089	638.2862	0.650649
112.633	-8.089	635.5095	0.647818
112.733	-8.089	632.8138	0.64507
112.833	-8.089	630.3195	0.642528
112.933	-8.089	627.9445	0.640107
113.033	-8.089	625.6663	0.637784
113.133	-8.089	623.6702	0.635749
112.133	-7.989	633.6941	0.645968
112.233	-7.989	631.5792	0.643812
112.333	-7.989	629.6793	0.641875
112.433	-7.989	627.8254	0.639985
112.533	-7.989	626.003	0.638127
112.633	-7.989	624.2303	0.63632
112.733	-7.989	622.4676	0.634524
112.833	-7.989	620.7834	0.632807
112.933	-7.989	619.3181	0.631313
113.033	-7.989	618.1027	0.630074

113.133	-7.989	617.3388	0.629295
112.133	-7.889	628.8555	0.641035
112.233	-7.889	628.2881	0.640457
112.333	-7.889	627.7579	0.639916
112.433	-7.889	627.2581	0.639407
112.533	-7.889	626.6447	0.638782
112.633	-7.889	625.7107	0.637829
112.733	-7.889	624.5116	0.636607
112.833	-7.889	623.3842	0.635458
112.933	-7.889	622.4832	0.634539
113.033	-7.889	622.2797	0.634332
112.133	-7.789	643.3492	0.65581
112.233	-7.789	645.2152	0.657712
112.333	-7.789	646.8051	0.659332
112.433	-7.789	648.0965	0.660649
112.533	-7.789	648.8046	0.661371
112.633	-7.789	648.5507	0.661112
112.733	-7.789	647.3999	0.659939
112.833	-7.789	646.1719	0.658687
112.133	-7.689	693.0559	0.706479
112.233	-7.689	698.997	0.712535
112.333	-7.689	704.1954	0.717834
112.433	-7.689	708.6405	0.722365
112.533	-7.689	711.7996	0.725586
112.633	-7.689	712.1772	0.725971
112.433	-7.589	857.5019	0.87411
112.533	-7.589	867.5303	0.884333

Tabel 3. Nilai Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada Kondisi Spektra  $T = 1$  detik ( $S_1$ ) pada wilayah Malang

lon	lat	zgal	zg
112.333	-8.489	268.4954	0.273696
112.433	-8.489	265.6708	0.270816
112.533	-8.489	262.9958	0.26809
112.633	-8.489	260.3672	0.26541
112.733	-8.489	257.5417	0.26253
112.833	-8.489	255.1619	0.260104
112.933	-8.489	252.7285	0.257623
112.233	-8.389	253.3478	0.258255
112.333	-8.389	250.9766	0.255838
112.433	-8.389	248.775	0.253593
112.533	-8.389	246.5615	0.251337
112.633	-8.389	244.3132	0.249045
112.733	-8.389	242.3835	0.247078
112.833	-8.389	240.4656	0.245123
112.933	-8.389	238.6053	0.243227
113.033	-8.389	236.8437	0.241431
112.233	-8.289	239.1711	0.243803
112.333	-8.289	237.0898	0.241682
112.433	-8.289	235.2365	0.239793
112.533	-8.289	233.6869	0.238213
112.633	-8.289	232.1573	0.236654
112.733	-8.289	230.7181	0.235187
112.833	-8.289	229.4407	0.233885
112.933	-8.289	228.1511	0.23257
113.033	-8.289	226.973	0.231369
112.233	-8.189	228.3326	0.232755

112.333	-8.189	227.0713	0.231469
112.433	-8.189	225.8702	0.230245
112.533	-8.189	224.7176	0.22907
112.633	-8.189	223.6453	0.227977
112.733	-8.189	222.6403	0.226952
112.833	-8.189	221.7227	0.226017
112.933	-8.189	220.911	0.22519
113.033	-8.189	220.2831	0.22455
113.133	-8.189	219.6939	0.223949
112.233	-8.089	221.4178	0.225706
112.333	-8.089	220.5832	0.224855
112.433	-8.089	219.8168	0.224074
112.533	-8.089	219.1089	0.223353
112.633	-8.089	218.4309	0.222661
112.733	-8.089	217.7948	0.222013
112.833	-8.089	217.3066	0.221515
112.933	-8.089	216.9437	0.221145
113.033	-8.089	216.6769	0.220873
113.133	-8.089	216.7007	0.220898
112.133	-7.989	218.4492	0.22268
112.233	-7.989	218.0556	0.222279
112.333	-7.989	217.7246	0.221942
112.433	-7.989	217.3774	0.221588
112.533	-7.989	217.0564	0.22126
112.633	-7.989	216.7616	0.22096
112.733	-7.989	216.4951	0.220688
112.833	-7.989	216.3526	0.220543
112.933	-7.989	216.4087	0.2206
113.033	-7.989	216.6535	0.22085



113.133	-7.989	217.2709	0.221479
112.133	-7.889	218.8837	0.223123
112.233	-7.889	218.9651	0.223206
112.333	-7.889	219.0447	0.223287
112.433	-7.889	219.1382	0.223382
112.533	-7.889	219.2343	0.22348
112.633	-7.889	219.2414	0.223488
112.733	-7.889	219.2304	0.223476
112.833	-7.889	219.375	0.223624
112.933	-7.889	219.6842	0.223939
113.033	-7.889	220.4464	0.224716
112.133	-7.789	224.7618	0.229115
112.233	-7.789	225.513	0.229881
112.333	-7.789	226.1525	0.230533
112.433	-7.789	226.6786	0.231069
112.533	-7.789	227.1007	0.231499
112.633	-7.789	227.3116	0.231714
112.733	-7.789	227.3993	0.231804
112.833	-7.789	227.6378	0.232047
112.133	-7.689	239.1497	0.243782
112.233	-7.689	240.9112	0.245577
112.333	-7.689	242.4125	0.247108
112.433	-7.689	243.6772	0.248397
112.533	-7.689	244.6472	0.249386
112.633	-7.689	244.9661	0.249711
112.433	-7.589	279.4758	0.284889
112.533	-7.589	281.3291	0.286778

Tabel 4. Geometri dari pemodelan Sesar *Back Arc 1*

lon	lat	depth
113.78	-7.38	3
114.376	-7.391	3
115.1187	-7.4428	3
116.1955	-7.39	3

Tabel 5. Geometri dari pemodelan Sesar Kendeng

lon	lat	depth
110.44	-7.04	3
110.82	-7.1	3
111.13	-7.16	3
111.59	-7.25	3
112.1	-7.32	3
112.59	-7.35	3
112.98	-7.33	3
113.49	-7.37	3
113.78	-7.38	3

Tabel 6. Geometri dari pemodelan Sesar Opak

lon	lat	depth
110.3131	-7.9948	18
110.3601	-7.95	18
110.3938	-7.8929	18
110.4249	-7.8636	18
110.4941	-7.7762	18

Tabel 7. Geometri dari pemodelan *Megathrust* Jawa Timur

lon	lat	depth
110.651	-10.2828	5
110.8642	-8.8581	50

111.9632	-9.0581	50
112.8384	-9.1832	50
113.7148	-9.3086	50
114.3538	-9.4002	50
114.161	-10.7866	5
113.0943	-10.6486	5
112.2125	-10.5607	5
111.8376	-10.523	5

Tabel 8. Geometri dari pemodelan *Megathrust* Jawa Tengah

lon	lat	depth
108.0731	-9.8683	5
108.8412	-8.3478	50
109.2419	-8.4742	50
110.1061	-8.6787	50
110.8642	-8.8581	50
110.651	-10.2828	5
109.4015	-10.166	5
108.8336	-10.0297	5

Tabel 9. Geometri dari pemodelan *Megathrust* Sumba

x	y	depth
114.161	-10.7866	5
114.3538	-9.4002	50
114.9172	-9.4796	50
115.6234	-9.5681	50
116.3091	-9.6076	50
116.9528	-9.6448	50
117.9667	-9.6448	50
118.4356	-9.6448	50

118.9516	-9.6582	50
119.7694	-9.6559	50
119.6645	-11.1372	5
118.8859	-11.0463	5
118.3593	-11.1221	5
117.7738	-11.2382	5
116.8374	-11.2897	5
116.1051	-11.1874	5
115.4864	-11.1779	5
114.6525	-11.0123	5

Tabel 10. Geometri dari pemodelan *Background Shallow*

lon	lat	depth
108.8412	-8.3478	10
110.1306	-3.5256	10
114.5227	-3.5816	10
119.8939	-4.0012	10
119.8939	-7.3862	10
119.764	-9.6559	10
116.7694	-9.6448	10
114.3538	-9.4002	10
110.8642	-8.8581	10
109.2419	-8.4742	10

Tabel 11. Geometri dari pemodelan *Background Deep 1*

lon	lat	depth
108.8412	-8.3478	55
110.1306	-3.5256	55
114.5227	-3.5816	55
119.8939	-4.0012	55

119.8939	-7.3862	55
119.764	-9.6559	55
116.7694	-9.6448	55
114.3538	-9.4002	55
110.8642	-8.8581	55
109.2419	-8.4742	55

Tabel 12. Geometri dari pemodelan *Background Deep 2*

lon	lat	depth
108.8412	-8.3478	105
110.1306	-3.5256	105
114.5227	-3.5816	105
119.8939	-4.0012	105
119.8939	-7.3862	105
119.764	-9.6559	105
116.7694	-9.6448	105
114.3538	-9.4002	105
110.8642	-8.8581	105
109.2419	-8.4742	105

Tabel 13. Geometri dari pemodelan *Background Deep 3*

lon	lat	depth
108.8412	-8.3478	155
110.1306	-3.5256	155
114.5227	-3.5816	155
119.8939	-4.0012	155
119.8939	-7.3862	155
119.764	-9.6559	155
116.7694	-9.6448	155
114.3538	-9.4002	155

110.8642	-8.8581	155
109.2419	-8.4742	155

Tabel 14. Geometri dari pemodelan *Background Deep 4*

lon	lat	depth
108.8412	-8.3478	205
110.1306	-3.5256	205
114.5227	-3.5816	205
119.8939	-4.0012	205
119.8939	-7.3862	205
119.764	-9.6559	205
116.7694	-9.6448	205
114.3538	-9.4002	205
110.8642	-8.8581	205
109.2419	-8.4742	205

Tabel 15. Koordinat *site* yang ditinjau

Nama Daerah	lon	lat
Kota Malang	112.627	-7.972
Kota Batu	112.530	-7.874
Sumbermajing	112.684	-8.417
Kepanjen	112.565	-8.130
Bumiaji	112.540	-7.715
Singosari	112.582	-7.781

Tabel 16. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Singosari

Singosari									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
6.97E+00	1.02E-03	4.85E+00	1.02E-03	1.77E+00	1.02E-03	5.37E-02	0.0010	2.94E-01	0.0010
5.55E+00	1.52E-03	3.58E+00	1.52E-03	1.67E+00	1.52E-03	4.43E-02	0.0015	2.54E-01	0.0015

4.20E+00	2.27E-03	2.46E+00	2.27E-03	1.49E+00	2.27E-03	3.53E-02	0.0023	2.12E-01	0.0023
2.97E+00	3.38E-03	1.58E+00	3.38E-03	1.19E+00	3.38E-03	2.73E-02	0.0034	1.70E-01	0.0034
1.94E+00	5.05E-03	9.45E-01	5.05E-03	8.45E-01	5.05E-03	2.04E-02	0.0050	1.31E-01	0.0050
1.17E+00	7.53E-03	5.26E-01	7.53E-03	5.34E-01	7.53E-03	1.49E-02	0.0075	9.56E-02	0.0075
6.66E-01	1.12E-02	2.72E-01	1.12E-02	3.16E-01	1.12E-02	1.05E-02	0.0112	6.62E-02	0.0112
3.60E-01	1.68E-02	1.31E-01	1.68E-02	1.78E-01	1.68E-02	7.24E-03	0.0168	4.31E-02	0.0168
1.81E-01	2.50E-02	5.82E-02	2.50E-02	9.21E-02	2.50E-02	4.85E-03	0.0250	2.63E-02	0.0250
8.35E-02	3.73E-02	2.36E-02	3.73E-02	4.17E-02	3.73E-02	3.14E-03	0.0373	1.50E-02	0.0373
3.50E-02	5.57E-02	8.67E-03	5.57E-02	1.64E-02	5.57E-02	1.96E-03	0.0557	8.00E-03	0.0557
1.35E-02	8.31E-02	2.81E-03	8.31E-02	5.53E-03	8.31E-02	1.18E-03	0.0831	4.00E-03	0.0831
4.85E-03	1.24E-01	7.84E-04	1.24E-01	1.54E-03	1.24E-01	6.71E-04	0.1239	1.86E-03	0.1239
1.66E-03	1.85E-01	1.83E-04	1.85E-01	3.16E-04	1.85E-01	3.58E-04	0.1849	8.03E-04	0.1849
5.71E-04	2.76E-01	3.48E-05	2.76E-01	4.29E-05	2.76E-01	1.76E-04	0.2759	3.17E-04	0.2759
2.00E-04	4.12E-01	5.25E-06	4.12E-01	3.59E-06	4.12E-01	7.84E-05	0.4115	1.13E-04	0.4115
6.73E-05	6.14E-01	6.13E-07	6.14E-01	1.86E-07	6.14E-01	3.10E-05	0.6140	3.54E-05	0.6140
2.04E-05	9.16E-01	5.46E-08	9.16E-01	6.57E-09	9.16E-01	1.08E-05	0.9160	9.57E-06	0.9160
5.41E-06	1.37E+00	3.65E-09	1.37E+00	1.80E-10	1.37E+00	3.25E-06	1.3666	2.16E-06	1.3666
1.24E-06	2.04E+00	1.81E-10	2.04E+00	3.95E-12	2.04E+00	8.47E-07	2.0387	3.96E-07	2.0387

Tabel 17. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Sumbermanjing

Sumbermanjing									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
8.77E+00	1.02E-03	6.72E+00	1.02E-03	1.76E+00	1.02E-03	4.63E-02	1.02E-03	2.54E-01	1.02E-03
7.35E+00	1.52E-03	5.44E+00	1.52E-03	1.65E+00	1.52E-03	3.79E-02	1.52E-03	2.18E-01	1.52E-03
5.84E+00	2.27E-03	4.19E+00	2.27E-03	1.44E+00	2.27E-03	3.01E-02	2.27E-03	1.81E-01	2.27E-03
4.33E+00	3.38E-03	3.05E+00	3.38E-03	1.11E+00	3.38E-03	2.32E-02	3.38E-03	1.44E-01	3.38E-03
2.93E+00	5.05E-03	2.09E+00	5.05E-03	7.22E-01	5.05E-03	1.74E-02	5.05E-03	1.10E-01	5.05E-03

1.82E+00	7.53E-03	1.33E+00	7.53E-03	3.88E-01	7.53E-03	1.27E-02	7.53E-03	8.07E-02	7.53E-03
1.04E+00	1.12E-02	7.97E-01	1.12E-02	1.74E-01	1.12E-02	9.11E-03	1.12E-02	5.61E-02	1.12E-02
5.54E-01	1.68E-02	4.44E-01	1.68E-02	6.69E-02	1.68E-02	6.37E-03	1.68E-02	3.68E-02	1.68E-02
2.80E-01	2.50E-02	2.30E-01	2.50E-02	2.24E-02	2.50E-02	4.34E-03	2.50E-02	2.26E-02	2.50E-02
1.33E-01	3.73E-02	1.11E-01	3.73E-02	6.53E-03	3.73E-02	2.87E-03	3.73E-02	1.30E-02	3.73E-02
5.94E-02	5.57E-02	4.90E-02	5.57E-02	1.53E-03	5.57E-02	1.83E-03	5.57E-02	6.98E-03	5.57E-02
2.48E-02	8.31E-02	1.99E-02	8.31E-02	2.55E-04	8.31E-02	1.12E-03	8.31E-02	3.51E-03	8.31E-02
9.61E-03	1.24E-01	7.28E-03	1.24E-01	2.64E-05	1.24E-01	6.47E-04	1.24E-01	1.65E-03	1.24E-01
3.45E-03	1.85E-01	2.38E-03	1.85E-01	1.56E-06	1.85E-01	3.50E-04	1.85E-01	7.18E-04	1.85E-01
1.14E-03	2.76E-01	6.78E-04	2.76E-01	5.01E-08	2.76E-01	1.74E-04	2.76E-01	2.86E-04	2.76E-01
3.44E-04	4.12E-01	1.64E-04	4.12E-01	9.08E-10	4.12E-01	7.77E-05	4.12E-01	1.02E-04	4.12E-01
9.59E-05	6.14E-01	3.26E-05	6.14E-01	1.09E-11	6.14E-01	3.09E-05	6.14E-01	3.24E-05	6.14E-01
2.47E-05	9.16E-01	5.16E-06	9.16E-01	1.09E-13	9.16E-01	1.08E-05	9.16E-01	8.78E-06	9.16E-01
5.87E-06	1.37E+00	6.31E-07	1.37E+00	9.72E-16	1.37E+00	3.25E-06	1.37E+00	1.99E-06	1.37E+00
1.27E-06	2.04E+00	5.81E-08	2.04E+00	6.15E-18	2.04E+00	8.48E-07	2.04E+00	3.66E-07	2.04E+00

Tabel 18. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Kota Malang

Kota Malang									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
7.52E+00	0.0010	5.41E+00	0.0010	1.77E+00	0.0010	5.17E-02	0.0010	2.84E-01	0.0010
6.07E+00	0.0015	4.11E+00	0.0015	1.67E+00	0.0015	4.26E-02	0.0015	2.45E-01	0.0015
4.65E+00	0.0023	2.93E+00	0.0023	1.48E+00	0.0023	3.40E-02	0.0023	2.04E-01	0.0023
3.33E+00	0.0034	1.95E+00	0.0034	1.18E+00	0.0034	2.63E-02	0.0034	1.63E-01	0.0034
2.18E+00	0.0050	1.21E+00	0.0050	8.22E-01	0.0050	1.97E-02	0.0050	1.26E-01	0.0050
1.31E+00	0.0075	7.01E-01	0.0075	5.02E-01	0.0075	1.44E-02	0.0075	9.20E-02	0.0075
7.27E-01	0.0112	3.77E-01	0.0112	2.76E-01	0.0112	1.02E-02	0.0112	6.38E-02	0.0112
3.74E-01	0.0168	1.89E-01	0.0168	1.36E-01	0.0168	7.06E-03	0.0168	4.17E-02	0.0168



1.77E-01	0.0250	8.77E-02	0.0250	5.91E-02	0.0250	4.75E-03	0.0250	2.55E-02	0.0250
7.73E-02	0.0373	3.75E-02	0.0373	2.22E-02	0.0373	3.09E-03	0.0373	1.46E-02	0.0373
3.15E-02	0.0557	1.46E-02	0.0557	7.17E-03	0.0557	1.94E-03	0.0557	7.79E-03	0.0557
1.21E-02	0.0831	5.08E-03	0.0831	1.93E-03	0.0831	1.17E-03	0.0831	3.90E-03	0.0831
4.43E-03	0.1239	1.56E-03	0.1239	3.88E-04	0.1239	6.68E-04	0.1239	1.82E-03	0.1239
1.60E-03	0.1849	4.07E-04	0.1849	5.16E-05	0.1849	3.57E-04	0.1849	7.88E-04	0.1849
5.81E-04	0.2759	8.86E-05	0.2759	4.11E-06	0.2759	1.76E-04	0.2759	3.12E-04	0.2759
2.05E-04	0.4115	1.55E-05	0.4115	1.90E-07	0.4115	7.83E-05	0.4115	1.11E-04	0.4115
6.81E-05	0.6140	2.14E-06	0.6140	5.47E-09	0.6140	3.10E-05	0.6140	3.50E-05	0.6140
2.05E-05	0.9160	2.28E-07	0.9160	1.15E-10	0.9160	1.08E-05	0.9160	9.45E-06	0.9160
5.40E-06	1.3666	1.83E-08	1.3666	1.98E-12	1.3666	3.25E-06	1.3666	2.14E-06	1.3666
1.24E-06	2.0387	1.09E-09	2.0387	2.73E-14	2.0387	8.47E-07	2.0387	3.92E-07	2.0387

Tabel 19. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Kepanjen

Kepanjen									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
8.03E+00	0.0010	5.94E+00	0.0010	1.77E+00	0.0010	4.98E-02	0.0010	2.74E-01	0.0010
6.57E+00	0.0015	4.63E+00	0.0015	1.66E+00	0.0015	4.10E-02	0.0015	2.35E-01	0.0015
5.09E+00	0.0023	3.40E+00	0.0023	1.46E+00	0.0023	3.26E-02	0.0023	1.96E-01	0.0023
3.68E+00	0.0034	2.34E+00	0.0034	1.15E+00	0.0034	2.52E-02	0.0034	1.56E-01	0.0034
2.43E+00	0.0050	1.51E+00	0.0050	7.85E-01	0.0050	1.89E-02	0.0050	1.20E-01	0.0050
1.46E+00	0.0075	9.02E-01	0.0075	4.59E-01	0.0075	1.38E-02	0.0075	8.80E-02	0.0075
8.09E-01	0.0112	5.04E-01	0.0112	2.34E-01	0.0112	9.86E-03	0.0112	6.12E-02	0.0112
4.13E-01	0.0168	2.62E-01	0.0168	1.04E-01	0.0168	6.85E-03	0.0168	4.00E-02	0.0168
1.96E-01	0.0250	1.27E-01	0.0250	4.03E-02	0.0250	4.63E-03	0.0250	2.45E-02	0.0250
8.72E-02	0.0373	5.65E-02	0.0373	1.36E-02	0.0373	3.03E-03	0.0373	1.41E-02	0.0373
3.64E-02	0.0557	2.31E-02	0.0557	3.90E-03	0.0557	1.91E-03	0.0557	7.54E-03	0.0557

1.44E-02	0.0831	8.54E-03	0.0831	8.86E-04	0.0831	1.16E-03	0.0831	3.78E-03	0.0831
5.39E-03	0.1239	2.81E-03	0.1239	1.40E-04	0.1239	6.63E-04	0.1239	1.77E-03	0.1239
1.95E-03	0.1849	8.08E-04	0.1849	1.37E-05	0.1849	3.56E-04	0.1849	7.68E-04	0.1849
6.78E-04	0.2759	1.97E-04	0.2759	7.60E-07	0.2759	1.76E-04	0.2759	3.05E-04	0.2759
2.26E-04	0.4115	3.93E-05	0.4115	2.40E-08	0.4115	7.82E-05	0.4115	1.09E-04	0.4115
7.16E-05	0.6140	6.28E-06	0.6140	4.78E-10	0.6140	3.10E-05	0.6140	3.43E-05	0.6140
2.08E-05	0.9160	7.79E-07	0.9160	7.27E-12	0.9160	1.08E-05	0.9160	9.28E-06	0.9160
5.43E-06	1.3666	7.35E-08	1.3666	9.42E-14	1.3666	3.25E-06	1.3666	2.10E-06	1.3666
1.24E-06	2.0387	5.19E-09	2.0387	9.62E-16	2.0387	8.48E-07	2.0387	3.86E-07	2.0387

Tabel 20. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Kota Batu

Kota Batu									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
7.28E+00	0.0010	5.17E+00	0.0010	1.77E+00	0.0010	5.27E-02	0.0010	2.89E-01	0.0010
5.83E+00	0.0015	3.87E+00	0.0015	1.67E+00	0.0015	4.35E-02	0.0015	2.49E-01	0.0015
4.44E+00	0.0023	2.72E+00	0.0023	1.48E+00	0.0023	3.46E-02	0.0023	2.08E-01	0.0023
3.15E+00	0.0034	1.78E+00	0.0034	1.18E+00	0.0034	2.67E-02	0.0034	1.66E-01	0.0034
2.06E+00	0.0050	1.08E+00	0.0050	8.27E-01	0.0050	2.00E-02	0.0050	1.28E-01	0.0050
1.24E+00	0.0075	6.15E-01	0.0075	5.13E-01	0.0075	1.46E-02	0.0075	9.36E-02	0.0075
6.94E-01	0.0112	3.25E-01	0.0112	2.93E-01	0.0112	1.04E-02	0.0112	6.49E-02	0.0112
3.65E-01	0.0168	1.60E-01	0.0168	1.55E-01	0.0168	7.15E-03	0.0168	4.24E-02	0.0168
1.77E-01	0.0250	7.26E-02	0.0250	7.35E-02	0.0250	4.80E-03	0.0250	2.59E-02	0.0250
7.84E-02	0.0373	3.03E-02	0.0373	3.02E-02	0.0373	3.12E-03	0.0373	1.48E-02	0.0373
3.21E-02	0.0557	1.15E-02	0.0557	1.08E-02	0.0557	1.95E-03	0.0557	7.89E-03	0.0557
1.23E-02	0.0831	3.87E-03	0.0831	3.26E-03	0.0831	1.17E-03	0.0831	3.95E-03	0.0831
4.43E-03	0.1239	1.14E-03	0.1239	7.79E-04	0.1239	6.70E-04	0.1239	1.84E-03	0.1239
1.57E-03	0.1849	2.83E-04	0.1849	1.30E-04	0.1849	3.58E-04	0.1849	7.96E-04	0.1849

5.62E-04	0.2759	5.80E-05	0.2759	1.37E-05	0.2759	1.76E-04	0.2759	3.15E-04	0.2759
2.01E-04	0.4115	9.49E-06	0.4115	8.60E-07	0.4115	7.84E-05	0.4115	1.12E-04	0.4115
6.75E-05	0.6140	1.21E-06	0.6140	3.33E-08	0.6140	3.10E-05	0.6140	3.52E-05	0.6140
2.04E-05	0.9160	1.19E-07	0.9160	8.97E-10	0.9160	1.08E-05	0.9160	9.51E-06	0.9160
5.41E-06	1.3666	8.76E-09	1.3666	1.93E-11	1.3666	3.25E-06	1.3666	2.15E-06	1.3666
1.24E-06	2.0387	4.80E-10	2.0387	3.34E-13	2.0387	8.47E-07	2.0387	3.94E-07	2.0387

Tabel 21. Nilai *annual rate of exceedance* terhadap PGA di wilayah Bumiaji

Bumiaji									
Total		Subduksi		Fault		Shallow		Deep	
6.7996	1.02E-03	4.6799	1.02E-03	1.7702	1.02E-03	0.0540	0.0010	0.2954	0.0010
5.3884	1.52E-03	3.4164	1.52E-03	1.6717	1.52E-03	0.0446	0.0015	0.2557	0.0015
4.0644	2.27E-03	2.3295	2.27E-03	1.4857	2.27E-03	0.0356	0.0023	0.2136	0.0023
2.8722	3.38E-03	1.4794	3.38E-03	1.1938	3.38E-03	0.0275	0.0034	0.1715	0.0034
1.8725	5.05E-03	0.8746	5.05E-03	0.8455	5.05E-03	0.0206	0.0050	0.1318	0.0050
1.1309	7.53E-03	0.4814	7.53E-03	0.5380	7.53E-03	0.0150	0.0075	0.0965	0.0075
0.6487	1.12E-02	0.2466	1.12E-02	0.3248	1.12E-02	0.0106	0.0112	0.0668	0.0112
0.3590	1.68E-02	0.1172	1.68E-02	0.1910	1.68E-02	0.0073	0.0168	0.0435	0.0168
0.1884	2.50E-02	0.0513	2.50E-02	0.1057	2.50E-02	0.0049	0.0250	0.0265	0.0250
0.0910	3.73E-02	0.0206	3.73E-02	0.0522	3.73E-02	0.0032	0.0373	0.0151	0.0373
0.0399	5.57E-02	0.0074	5.57E-02	0.0225	5.57E-02	0.0020	0.0557	0.0081	0.0557
0.0159	8.31E-02	0.0023	8.31E-02	0.0084	8.31E-02	0.0012	0.0831	0.0040	0.0831
0.0058	1.24E-01	0.0006	1.24E-01	0.0026	1.24E-01	0.0007	0.1239	0.0019	0.1239
0.0020	1.85E-01	0.0001	1.85E-01	0.0006	1.85E-01	0.0004	0.1849	0.0008	0.1849
0.0006	2.76E-01	0.0000	2.76E-01	0.0001	2.76E-01	0.0002	0.2759	0.0003	0.2759
0.0002	4.12E-01	0.0000	4.12E-01	0.0000	4.12E-01	0.0001	0.4115	0.0001	0.4115
0.0001	6.14E-01	0.0000	6.14E-01	0.0000	6.14E-01	0.0000	0.6140	0.0000	0.6140
0.0000	9.16E-01	0.0000	9.16E-01	0.0000	9.16E-01	0.0000	0.9160	0.0000	0.9160
0.0000	1.37E+00	0.0000	1.37E+00	0.0000	1.37E+00	0.0000	1.3666	0.0000	1.3666

0.0000	2.04E+00	0.0000	2.04E+00	0.0000	2.04E+00	0.0000	2.0387	0.0000	2.0387
--------	----------	--------	----------	--------	----------	--------	--------	--------	--------

## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara yang dilahirkan di Mojokerto, 1 September 1996 dari pasangan Bapak Sugeng Hariono dan Ibu Yayuk Sri Wahyuni. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Trawas 1 (2002-2008), SMPN 1 Trawas (2008-2011) dan SMAN 1 Puri Mojokerto (2011-2013). Pada pertengahan 2013 penulis diterima di jurusan Fisika FMIPA ITS melalui jalur sbmptn dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 1113100096. Selama perkuliahan penulis mengikuti berbagai organisasi kemahasiswaan intra kampus. Beberapa organisasi yang telah diikuti penulis adalah sebagai staff Hubungan Luar HIMASIKA ITS (2014-2015), staff Hubungan Luar BEM FMIPA ITS (2014-2015), staff *Public Relation Department* AAPG ITS SC (2015), Sekretaris Departemen Hubungan Luar BEM FMIPA ITS (2015-2016), dan Sekretaris *Public Relation Department* AAPG ITS SC (2016). Selain itu penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen Fisika Dasar 1 dan 2, Asisten Laboratorium Fisika Dasar 1 dan 2, dan Asisten Praktikum mata kuliah Seismologi. Bagi yang tertarik dengan topik tugas akhir, penulis dapat dihubungi melalui *email* pambayun11@gmail.com.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***